



Sammenligning og dokumentation af hydraulisk frakturering og direkte injektion med GeoProbe på Vadsbyvej, Hedehusene

Morænelerslokalitet -Vadsbyvej - Hedehusene. Notat

Damgaard, Ida; Broholm, Mette Martina; Christiansen, Camilla Maymann; Kessler, Timo Christian; Klint, k.e.; Nilsson, B.; Bjerg, Poul Løgstrup

Publication date:
2009

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Damgaard, I., Broholm, M. M., Christiansen, C. M., Kessler, T. C., Klint, K. E., Nilsson, B., & Bjerg, P. L. (2009). *Sammenligning og dokumentation af hydraulisk frakturering og direkte injektion med GeoProbe på Vadsbyvej, Hedehusene: Morænelerslokalitet -Vadsbyvej - Hedehusene. Notat*. DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet & Region Hovedstaden.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Notat

Morænelerslokaltet
Vadsbyvej
Hedehusene

Sammenligning og dokumentation af hydraulisk frakturering og direkte injektion med GeoProbe på Vadsbyvej, Hedehusene

August 2009

Rekvirent

Region Hovedstaden
Jordforureningsafdelingen
Kongens Vænge 2
3400 Hillerød

Henriette Kern-Jespersen
Carsten Bagge Jensen

Udarbejdelse af notat

DTU Miljø
Miljøvej, bygning 113
2800 Kgs. Lyngby

Ida Damgaard
Mette M. Broholm
Camilla M. Christiansen
Timo Kessler
Knud Erik Klint
Bertel Nilsson
Poul L. Bjerg

Indhold

INDHOLD	3
FORORD	5
SAMMENFATNING OG ANBEFALINGER	6
1 BAGGRUND OG FORMÅL	9
1.1 Indledning	9
1.2 Formål med undersøgelser	9
2 GEOLOGI	10
3 LOKALITET OG FORURENING	12
4 FRAKTURERINGS- OG INJEKTIONSMETODER	13
4.1 Direkte sonde-injektion med GeoProbe	14
4.2 Hydraulisk frakturering	15
5 DOKUMENTATIONSMETODER	16
6 STRATEGI	17
6.1 Direkte sonde-injektion med GeoProbe	18
6.2 Hydraulisk frakturering	18
7 RESULTATER – DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	20
7.1 Enkeltinjektion	20
7.2 Klyngefelt	22
7.3 Direkte injektion med GeoProbe, opsummering	26
8 RESULTATER - HYDRAULISK FRAKTURERING	27
8.1 Hydraulisk fraktur i 3 m u.t.	28
8.2 Hydraulisk fraktur i 6,5 m u.t.	29
8.3 Hydraulisk fraktur i 9,5 m u.t.	30
8.4 Hydraulisk multi fraktur – 6,25, 6,50, 6,75 og 7,00 m u.t.	31
8.5 Hydrauliske sprækker, opsummering	35
9 POTENTIALE FOR ANVENDELSE TIL OPRENSNING	36
9.1 Direkte injektion med GeoProbe	36
9.2 Hydraulisk frakturering	37
9.3 Sammenligning af injektionsmetoder	37

10	KONKLUSION	39
11	REFERENCER	40

Bilagsoversigt

1	BILAG – GEOLOGI	2
2	BILAG – FORSØGSOPSÆTNING, DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	3
3	BILAG – KERNER, DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	5
4	BILAG – UDGRAVNING, GEOPROBE	7
5	BILAG – TRYK, DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	9
6	BILAG – UDBREDELSE AF SPORSTOF, GEOPROBE	10
7	BILAG – OPTEGNINGER AF GEOLOGI, GEOPROBE	16
8	BILAG – KONCENTRATION AF SPORSTOFFER, GEOPROBE	19
9	BILAG – SPREDNING AF SPORSTOF, GEOPROBE, ENKELTINJEKTIONSFELT	23
10	BILAG – SPREDNING AF SPORSTOF, GEOPROBE, KLYNGEFELT	25
11	BILAG – FORSØGSOPSÆTNING, HYDRAULISK FRAKTURERING	27
12	BILAG – KERNER, HYDRAULISK FRAKTURERING	29
13	BILAG – UDGRAVNING, HYDRAULISK FRAKTURERING	32
14	BILAG – TRYK, HYDRAULISK FRAKTURERING	35
15	BILAG – LANDHÆVNING, HYDRAULISK FRAKTURERING	38
16	BILAG – UDBREDELSE AF SPORSTOF, HYDRAULISK FRAKTURERING	40
17	BILAG – OPTEGNINGER AF GEOLOGI, HYDRAULISK FRAKTURERING	41
18	BILAG – KONCENTRATION AF SPORSTOFFER, HF	42
19	BILAG – HYDRAULISKE FRAKTURER	44
20	BILAG – OPTEGNINGER AF SPORSTOFFER UD FRA KERNEPRØVER	47
21	BILAG – MONITERINGSBORING	54

Forord

In-situ oprensning af forurening med f.eks. klorerede opløsningsmidler i lavpermeable aflejringer, som moræner, udføres typisk hvor dybden til forureningen eller adgangsforholdene medfører, at bortgravning ikke er en økonomisk rentabel løsning. En væsentlig udfordring ved anvendelse af *in-situ* oprensning ved kemiske og biologiske metoder i lavpermeable aflejringer er at tilføre de reaktive stoffer og sikre den nødvendige kontakt med forureningen. Frakturerings- og injektionsmetoder benyttes her som alternativ til injektion i traditionelle filtersatte borer med henblik på at fremme tilførsel og kontakt.

I Danmark er tre metoder afprøvet eller anvendt ved oprensning af moræner forurenet med klorerede opløsningsmidler: pneumatisk frakturering, hydraulisk frakturering og direkte sonde-injektion. Pneumatisk frakturering blev afprøvet og dokumenteret på en morænerslokalitet i Vadsby i 2005/2006. Ved hydraulisk frakturering og direkte sonde-injektion med GeoProbe har fokus været forskelligt på lokaliteterne, hvor de er afprøvet/anvendt, og dokumentationen væsentligt mindre detaljeret. Resultaterne derfra er således ikke direkte sammenlignelige med resultaterne fra den pneumatiske frakturering. Der var derfor behov for en sammenlignelig afprøvning og dokumentation af de andre teknikker.

I nærværende projekt er direkte injektion med GeoProbe og hydraulisk frakturering afprøvet og dokumenteret på samme morænerslokalitet i Vadsby. Foruden at sikre en sammenlignelig afprøvning og dokumentation af teknikkerne på en morænerslokalitet er undersøgelserne udført med henblik på at vurdere metodernes anvendelighed ved oprensning af en forurening med klorerede opløsningsmidler på lokaliteten.

Undersøgelserne og dette notat er udført som et samarbejdsprojekt om injektionsmetoder til optimeret oprensning af forurenede moræner mellem DTU Miljø på Danmarks Tekniske Universitet og Region Hovedstaden. Projektgruppen har bestået af:

- Ida Damgaard, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
- Camilla Mayman Christiansen, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
- Timo Kessler, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
- Mette M. Broholm, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
- Poul L. Bjerg, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
- Knud Erik Klint, GEUS
- Bertel Nilsson, GEUS
- Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden
- Carsten Bagge Jensen, Region Hovedstaden

Undersøgelserne indgår endvidere i et større forskningsprojekt REMTEC. I dette regi foretages videre bearbejdning og tolkning af resultaterne med efterfølgende formidling i videnskabelig artikel.

Sammenfatning og anbefalinger

In-situ oprensning af forurening med f.eks. klorerede opløsningsmidler i lavpermeable aflejringer, som moræner, udføres typisk hvor dybden til forureningen eller adgangsforholdene medfører, at bortgravning ikke er en økonomisk rentabel løsning. En væsentlig udfordring ved anvendelse af *in-situ* oprensning ved kemiske og biologiske metoder i lavpermeable aflejringer er at tilføre de reaktive stoffer og sikre den nødvendige kontakt med forureningen.

For at lette *in situ* oprensning af lavpermeable lokaliteter er der udviklet flere metoder til at fremme muligheden for at tilsætte reaktive stoffer til lavpermeable aflejringer. Disse metoder omfatter pneumatisk frakturering, hydraulisk frakturering og direkte sondeinjektion. I dette projekt er hydraulisk frakturering og direkte sondeinjektion med GeoProbe afprøvet og dokumenteret på en lokalitet i Vadsby med henblik på at opnå god dokumentation af begge disse metoders egenskaber, samt et direkte sammenligningsgrundlag for alle tre injektionsmetoder på en typisk dansk morænelerslokalitet. Forsøgene er opstillet således at resultaterne kan benyttes ved projektering af en evt. *in-situ* oprensning af en større forurening med klorerede opløsningsmidler i morænelersaflejringer på lokaliteten. Spredningen er undersøgt ved at injicere sporstoffer med forskellige egenskaber: fluorescein (mobil), rhodamine WT (sorberende) og brilliant blå (synlig i dagslys).

Direkte injektion med GeoProbe er undersøgt ved injektion af sporstoffer i et enkelt injektionspunkt og i et klyngefelt (3 injektionspunkter med intern afstand på 0,75 m). Injektionerne er udført med 25 cm afstand i tre interval (2,5-3,5, 6-7 og 8,5-9,5 m u.t.) samt i et enkelt interval i klyngefeltet for hver 10 cm. Der er dokumenteret en transportradius på ca. 1,25 m over redoxgrænsen overvejende via naturlige sprækker, bioporer og sand slirer. Under redoxgrænsen er der ved enkeltinjektionspunktet og det første injektionspunkt i klyngefeltet fundet en transportradius af alle injektionsdybder på 1 m via inducerede sprækker under injektionen. Der er set tegn på, at sprækkerne ved anden og tredje injektion er sporet af sprækkerne fra første injektion, hvorfor transportradius i øvrige retninger kun er på 0,5 til 0,75 m. Den vertikale afstand mellem sporstofobservationerne i injektionsintervallerne svarede i 0,5 m's afstand, samt ved overlap mellem injektioner i klyngen, med injektionsafstanden (ca. 25 cm). Den vertikale afstand tiltog for enkeltinjektion og i øvrige retninger i klyngefeltet med afstand fra injektionspunktet (ca. dobbelte i 0,75 og 1 m). Resultaterne for injektionsintervallerne i klyngen er meget lovende mht. at opnå tilstrækkelig udbredelse og tæthed af reaktanter i en forurenede moræner.

Der er lavet hydraulisk frakturering i tre dybder: 3, 6,5 og 9,5 m u.t. Derudover er der lavet en multifrakstur, hvor 4 frakturer er lavet fra samme fraktureringsboring med 25 cm afstand (6,25, 6,50, 6,75 og 7,00 m u.t.). Efter fraktureringen er sporstofferne injiceret i frakturerne. I 3 m u.t. er der udført en hydraulisk sprække med en radius på 3-3,5 m, beliggende lidt forskudt i forhold til fraktureringsboringen. Sporstofferne er transporteret ca. 0,5 m længere ud end sprækken. Endvidere er sporstofferne spredt vertikalt via naturlige sprækker, bioporer og ormehuller (overvejende ved enden af frakturen). Der er udført en enkelt sprække i 6,5 m u.t.. Sprækkens beliggenhed er alene dokumenteret i 2 af 6 kerneboringer udført omkring fraktureringsboringen indenfor landhævningen. Det er på dette grundlag ikke muligt at vurdere den præcise udbredelse af sprækken eller at opnå massebalance for fraktursand eller tracer. Ved fraktureringen i 9,5 m u.t. skete der opskydning til terræn. Det er således meget tvivlsomt, om det vil være muligt at etablere en horisontal barriere under en forurening i 9,5 meters dybde på Vadsby lo-

kaliteten ved hydraulisk frakturering. Sprækken er i den øverste meter observeret udbredt i en naturlig sprække. De 4 fraktureringer udført fra en fraktureringsboring dannede ikke 4 individuelle horisontale sprækker: den øverste sprække er tilsyneladende blevet vertikal, de to dybeste af sprækkerne er lokaliseret og ses at løbe sammen i kort afstand fra fraktureringsboringen, og den sidste sprække er ikke truffet. Det er således ikke sandsynligt, at en tilstrækkelig tæthed af frakturer til at sikre oprensning på Vadsby lokaliteten kan etableres.

Ud fra resultaterne vurderes direkte injektion med GeoProbe anvendelig til at sprede reaktive stoffer i moræneleret i forbindelse med oprensning af forureningen på Vadsbyvej. Hydraulisk frakturering vurderes ikke anvendelig til afskæring af nedsivning fra den dybe forurening eller til at opnå tilstrækkelig behandlingstæthed i den primære del af forureningen i morænelersaflejringerne på lokaliteten. Direkte GeoProbe injektion er endvidere mest omkostningseffektiv.

1 Baggrund og formål

1.1 Indledning

Forureninger med klorerede opløsningsmidler kan oprensnes på flere forskellige måder, bl.a. ved en eller flere *in-situ* metoder /1/. Det har dog på morænelerslokaliteter vist sig svært at opnå god kontakt mellem eksisterende forurening og reaktive stoffer *in-situ*, og tidshorisonten på oprensningstiltag bliver styret af langsom diffusion.

For at lette *in-situ* oprensning af forurenede lokaliteter er der udviklet flere metoder til at fremme muligheden for at tilsætte reaktive stoffer til lavpermeable aflejringer. Disse metoder omfatter pneumatisk frakturering, hydraulisk frakturering og direkte sondeinjektion.

Ved frakturering bliver der groft sagt skabt kunstige sprækker i leret, hvori reaktive stoffer kan spredes og dermed hurtigere opnå kontakt med forurening i lerens matrix. Forskellene på metoderne ligger primært i de dannede sprækkers aperturer, tæthed og (influens)radius og/eller de injicerede væskers fordeling i jorden. Disse parametre er afgørende for oprensningstid og projektering af afværge. Der er derfor behov for kontrolleret afprøvning af metoderne på en morænelerslokalitet.

Pneumatisk frakturering er afprøvet på Vadsbyvejslokaliteten i december 2005. Ved fraktureringen injiceredes en række sporstoffer (brilliant blue, fluorescein, rhodamine WT og optisk hvidt) under højt tryk i 5 dybder (8, 7, 6, 5 og 4 m u.t.) i én boring. Efterfølgende dokumentationsaktiviteter (kerneprøvetagning, udgravning og vandprøvetagning) blev udført i december 2005 og forår/sommer 2006. Sporstofferne blev overvejende truffet i naturlige sprækker i en radius på ca. 1-2 m omkring boringen. Man håbede at observere dannelse af tætte, overlappende netværk af sprækker (i hvert fraktureringsinterval). Dokumentationsarbejdet afslørede dog ikke tegn herpå i de dybere injektionsniveauer, hvor den observerede sprækkeafstand var ≥ 1 m /2, 3/.

Hydraulisk frakturering og direkte sondeinjektion med GeoProbe er afprøvet/anvendt på andre lokaliteter i Danmark f.eks. Rugårdsvej og Gl. Kongevej /4, 5, 6/. Fokus har været forskelligt på lokaliteterne og dokumentationen væsentligt mindre detaljeret. Resultaterne derfra er således ikke direkte sammenlignelige med resultaterne fra den pneumatiske frakturering på Vadsbyvej. Der var derfor behov for en sammenlignelig afprøvning og dokumentation af de andre teknikker.

1.2 Formål med undersøgelser

I dette projekt ønskes det at afprøve og dokumentere hydraulisk frakturering og direkte sondeinjektion med GeoProbe på Vadsbyvejslokaliteten med henblik på at opnå god dokumentation af begge disse metoders egenskaber, samt et direkte sammenligningsgrundlag for alle tre injektionsmetoder på en typisk dansk morænelerslokalitet.

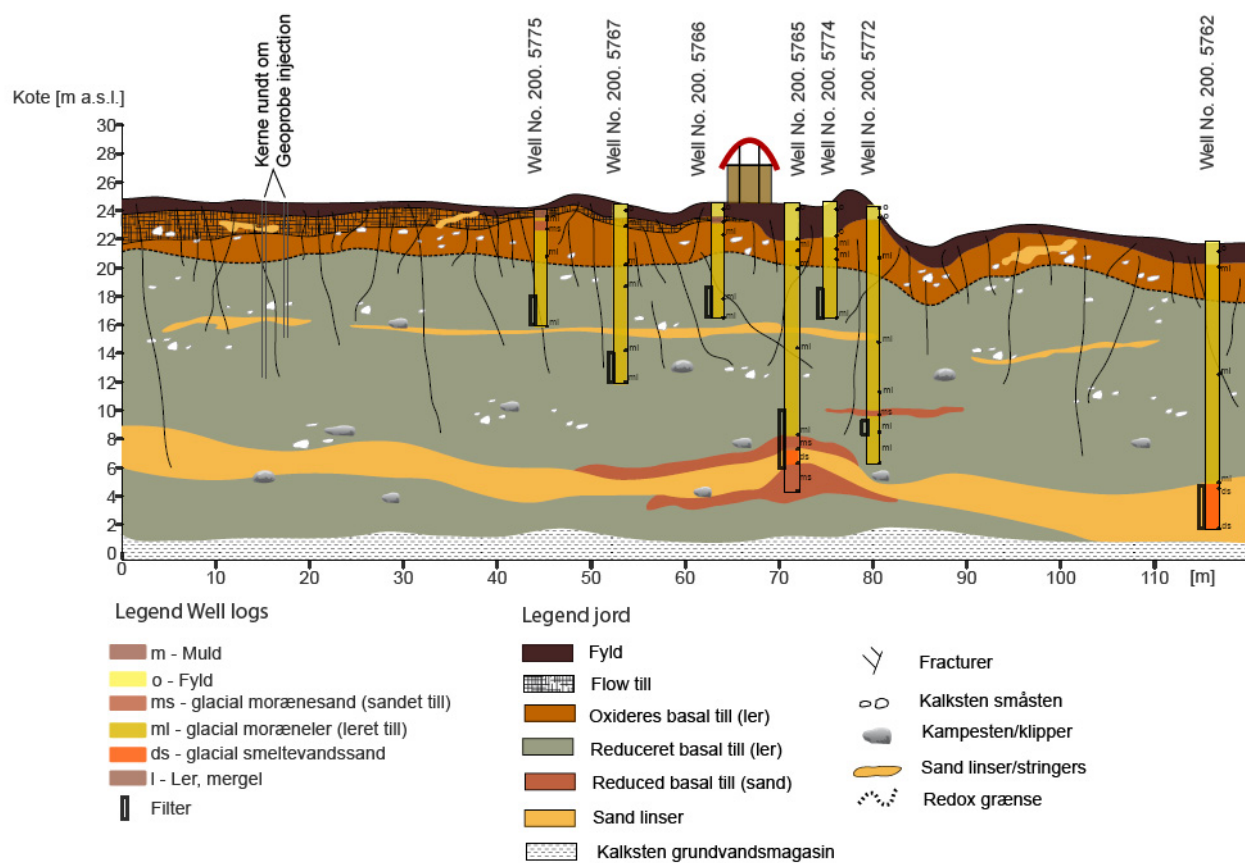
2 Geologi

Vadsby er beliggende på den nordlige flanke af en udbredt isoverskredet smeltevandsslette der dækker et område på 150 km² strækkende sig fra Vadsby i nord, Høje Tåstrup i øst, Lejre i vest til Havdrup imod syd. Smeltevandssletten udgør et højtliggende plateau der tolkes afsat under Hovedfremstødet i sidste istid. Smeltevandssletten betegnes Hedelandsformationen og udgør et af de største sammenhængende sand/grusmagasiner i Danmark. Denne smeltevandsslette er overskredet to gange under de Ungbaltiske isfremstød (17-16.000 BP) /7/, og Hedelandsformationen er således overlejret af to basale tills (morænelersbænke) i det meste af området, således også i Vadsby, hvor selve Hedelandsformationen kun tolkes repræsenteret af et tyndt lag smeltevandssand. Under af/nedsmeltning af den sidste is i området er der efterladt et kuperet dødislandskab syd-vest og nordøst for lokaliteten /8/.

Lokaliteten i Vadsby ligger på en nord-sydgående bakketop (bilag 1). Bakken er afgrænset imod vest af en lavning, hvor der afhængigt af årstiden findes en sø. Søen tolkes dannet som et dødishul. Imod øst er bakken afgrænset af en smeltevandssdal, hvori Vadsby å strømmer.

I figur 1 ses et geologisk tværsnit fra lokaliteten på Vadsbyvej. Under fyldlaget findes der i den vestlige del 1-2 meter flow till (flydemoræne). Under dette lag findes der ca. 17 meter moræneler. Omkring 8-9 meter under terræn optræder sandlinser i flere borer, og det tolkes at moræneleren kan opdeles i to morænebænke af hver ca. 8 meters tykkelse, der henføres til De Ungbaltiske Isfremstød. Den øvre morænebænk optræder velkonsolideret med varierende grad af opsprækning, og er klassificeret som en basal till (bundmoræne) afsat under et isfremstød der overskred området fra sydøst. Under denne bænk findes der igen moræneler indtil ca. 15 m u.t., hvor der optræder endnu et smeltevandssandlag. Det underste smeltevandssandlag er nogle steder i direkte kontakt med kalken (vest (DGU 200.430), øst (DGU 200.239B) og nord (DGU 200.3013) for lokaliteten) og andre steder overlejrer det et morænelerlag inden kalken findes (syd (DGU 200.682 og 200.2985)).

Redoxgrænsen findes i ca. 3-4 m u.t. Den øverste oxiderede moræneler er opsprækket, og der findes et større antal ormehuller og rodgange især i områdets vestlige del ved lavningen. Der er fundet et større antal glacialtektoniske sprækker på bakketoppen, hvor der i det lavere liggende område mod sydøst er fundet færre glacialtektoniske sprækker. Begge morænepakker indeholder flere sandslirer og – linser, samt mange store sten.

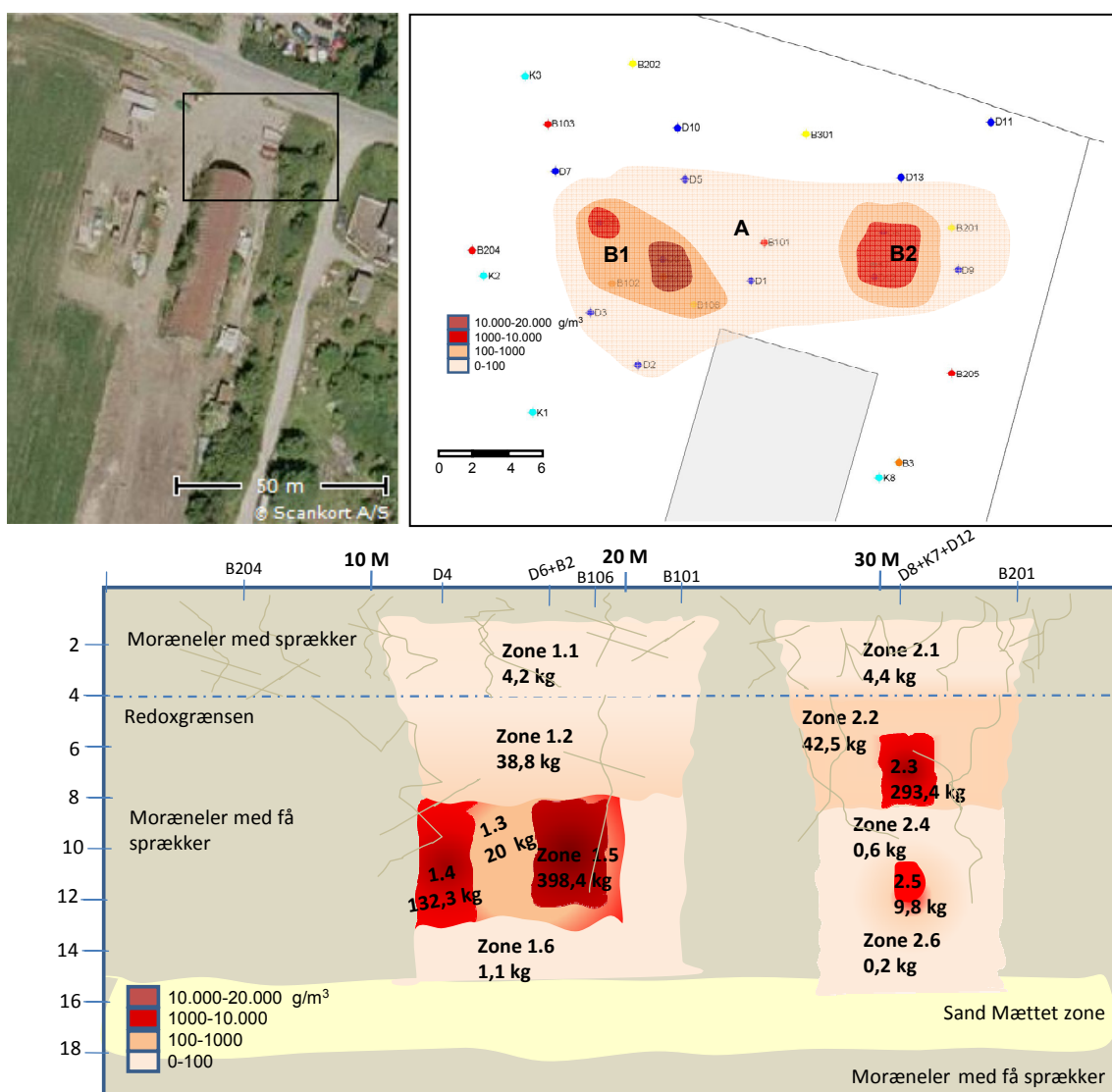


Figur 1: Geologisk tværsnit fra Vadsbyvej (sydvest – nordøst, se bilag 1).

3 Lokalitet og forurening

Industrigrunden Vadsbyvej 16A, 2640 Hedehusene (Høje-Taastrup) er i 2005 kortlagt som forurenet som følge af oplag af kemikalier (bl.a. klorerede opløsningsmidler) og maskinværkstedaktiviteter på lokaliteten i årrækken 1973-76, hhv. 1986-93. Lokaliteten anvendes i dag til landbrug /2/. Et luftfoto af lokaliteten kan ses i figur 2.

Den horisontale og vertikale udstrækning af forureningen med klorerede opløsningsmidler er blevet kortlagt (figur 2) /2/. Forureningen har gennem de sidste ca. 30 år spredt sig i moræneleret, initielt via transport i sprækker i leret og siden via diffusion ind i lerens matrix. Det ses, at en væsentlig andel af forureningen er beliggende i betydelig dybde. Den nuværende forureningstilstand på lokaliteten truer det underliggende grundvandsmagasin, og dermed drikkevandsindvindingen i området (København Energis kildeplads Brokilde) /2//3/.



Figur 2: Forureningens udbredelse horisontalt (top) og vertikalt (bund) på Vadsbyvej. Massefordelingen af klorerede opløsningsmidler er angivet i zoner på det vertikale tværsnit (figurer fra /9/).

4 Frakturerings- og injektionsmetoder

De 3 frakturerings- og injektionsmetoder har hver deres karakteristika:

- Direkte sonde-injektion (direct push med f.eks. GeoProbe)
- Hydraulisk frakturering
- Pneumatisk frakturering

der kan være af betydning for, i hvor høj grad de kan fremme tilførsel af reaktanter og kontakt med forureningen i forbindelse med kemiske og biologiske *in-situ* oprensninger i lavpermeable aflejringer, herunder moræner.

Modellering har vist, at man i lavpermeable aflejringer, hvor oprensningen er diffusionsbegrænset afhængigt af sorptionen i sedimentet, skal opnå en frakturæthed/reaktanttilførsel i størrelsesordenen 10 cm for at opnå en oprensningstid indenfor få årtier (en generation) /10/.

Ved direkte sondeinjektion, injiceres de reaktive stoffer direkte i undergrunden under tryk. Ved denne metode er der tvivl omkring mulighederne for at få injicerede stoffer ud i lavpermeable formationer som følge af risiko for betydelig opskydning langs injektionssonde ved stort modtryk. Det er desuden ikke dokumenteret, hvorledes de injicerede stoffer vil fordele sig. Naturlige sprækker, sandlinser mv. forventes potentielt at være styrende for spredningen af de injicerede stoffer. Influenradius omkring enkeltinjektioner forventes at være forholdsvis lille. Til gengæld giver metoden mulighed for injektion i mange diskrete dybder for hvert injektionspunkt, og der kan udføres injektioner i forholdsvis mange punkter om dagen. I kommerciel sammenhæng /11/ og /12/ er injektionerne lavet med en vertikal afstand på 25 cm. Det er muligt, at direkte sondeinjektion kan inducere tynde frakturer i leraflejringer. Metoden er fleksibel i forhold til placering af injektionspunkterne og muliggør skrå injektion under f.eks. huse. Reinjektion kræver remobilisering. Mobiliseringsomkostningerne ved metoden er forholdsvis beskedne og giver fleksibilitet mht. placeringen af nye injektionspunkter. Bortset fra evt. monitoringsboringer skal der ikke være faste installationer til behandlingen på lokaliteten i behandlingsperioden.

Ved hydraulisk frakturering skabes sandfyldte frakturer med typisk en tykkelse på fra mm til få cm. Frakturerne i nærværende undersøgelse tilstræbes at blive etableret som cirkulære sandfyldninger omkring fraktureringsboringen. Formen af frakturen afhænger af morænelerens konsolideringsforhold. Frakturerne forventes ideelt set at være centreret omkring fraktureringsboringen og med dybden at blive tiltagende skålformede. For at opnå succes med hydraulisk frakturering på Vadsby lokaliteten er det essentielt, at der kan laves relativt horisontale frakturer ned til en dybde på minimum 8-10 m u.t.. Generelle geotekniske overvejelser af konsolideringsforhold siger at frakturer lavet i 8-10 m u.t. gradvist vil stige mod overfladen. Ved tæt placering kan de spores mod hinanden, hvilket giver mulighed for overlap og etablering af horisontal barriere. Tidlige fraktureringsstudier (e.g./13/) har vist, at det er muligt at lave forholdsvis tætte sprækker i nogle lavpermeable sedimenter i få meters dybde. Det vides dog ikke, om det er muligt i dansk moræner på 8-10 meters dybde, hvor konsolideringsforholdene må forventes at modvirke en horisontal udbredelse af hydrauliske sprækker. Hydraulisk frakturering kan således benyttes med to forskellige formål: A) Oprensning i forurenede områder ved etablering af flere horisontale frakturer over dybden for at overkomme diffusionsbegrænsning. B) Etablering af en horisontal barriere for behandling af nedsivende forurening. I begrænset dybde forventes frakturerne ikke påvirket af naturlige sprækker og sandslirer,

mens det ikke er muligt at initiere en horisontal sprække i en sandlomme. Etableringen af hydrauliske sprækker giver god mulighed for tilførsel af reaktanter til sprækkerne. Ved etablering af permanente filtre i fraktureringsboringer der kan reinjiceres i sprækkerne. Mobiliseringsomkostningerne er overkommelige, men omkostningen pr. fraktur, der etableres, er betydelig. De forholdsvis tykke frakturer kan muligvis udgøre en fordel, når der ved biologiske metoder kan være behov for en zone med vækst af specifikke nedbrydere.

Ved pneumatisk frakturering forventedes dannet tætte netværk af tynde sprækker i le-raflejringeres matrix, reaktanter forstøves og injiceres under fraktureringen. Der forventedes således optimal kontakt mellem reaktanter og den forurenede formation. Sprækkerne forventes efter nogen tid at lukkes, og reinjektion forventes at kræve remobilisering. Da mobilisering pt. skal ske fra Nordamerika er mobiliseringsomkostningerne betydelige. Som tidligere nævnt viste det tidligere dokumentationsforsøg for pneumatisk frakturering ikke tegn på dannelse af tætte netværk i moræneleret på Vadsby lokaliteten.

I de følgende delafsnit er udførelsen af direkte injektion med GeoProbe og hydraulisk frakturering på Vadsbyvej beskrevet.

4.1 Direkte sonde-injektion med GeoProbe

Ved direkte injektion med GeoProbe monteres en injektionssonde på GeoProben. Injektionssonden er forbundet med en blandetank hvori injektionsvæsken laves. Ved forsøgene er anvendt en sporstofblanding som injektionsvæske. Mængden af injektionsvæske der pumpes til sonden styres af en flowmåler mellem blandetanken og sonden. Der er endvidere monteret en trykmåler mellem flowmåleren og sonden så det er muligt at følge trykket under injektionen. I figur 3 ses flowmåler, trykmåler, blandetank, GeoProbe, sonde og injektion med GeoProbe.



Figur 3: (øverst v) Flowmåler. (øverst h) Geoprobe benyttet til injektion. (nederst v) Injektionsspids. (nederst h) Under injektion med GeoProbe. Slangen er forbundet med blandingstanken.

4.2 Hydraulisk frakturering

Hydraulisk frakturering laves ved indledningsvis at ramme et fraktureringsrør ned til den ønskede fraktureringsdybde. Røret trækkes ca. 20 cm op (tilbage) for at skille røret fra spidsen og derved skabe kontakt med lerformationen. Herefter forskæres en horisontale fraktur med en radius på ca. 30 cm omkring fraktureringsrøret med en roterende højtryksdysse (vand). Boringen oprensnes efterfølgende ved at skylle med vand. På fraktureringsrøret monteres et tryktæt system med en slange forbundet med blandingsanlægget.

I blandingsanlægget blandes vand og ”guar” til en gele. Geleen pumpes med konstant flow ned i en roterende snegl, hvori en afmålt mængde fraktureringssand opblandes. Til blandingen tilsættes borax, der får geleen til at binde i lange tråde, hvorved sandet kan bæres af geleen og enzymmasse, der får geleen til at opløses, når fraktureringen er udført. Når den rette konsistens er opnået pumpes gelemassen gennem slangen ned i fraktureringsboringen. Trykket, der skabes, når gelemasse pumpes ned i boringen, tilstræbes at skabe en cirkulær fraktur rundt om fraktureringsboringen. Udbredelsen af frakturen afhænger primært af stressforholdene i jorden og sekundært af sammensætning og mængden af gelemasse, der pumpes ned i boringen. I figur 4 ses billeder af blandingsanlægget og fraktureringsboringen fra fraktureringen på Vadsbyvej.



Figur 4: (v) Fraktureringsboring med monteret tryktæt system der med en slange er forbundet til blandingsanlægget. Endvidere ses målepinde til løbende måling af landhævning. (h) Blandingsanlægget. Til venstre i billedet ses beholderen hvori geleen blandes. De blå spande under anlægget indeholder borax og enzymmasse.

Til fraktureringsforsøgene er anvendt epoxycoated fraktursand i forskellige farver med henblik på at kunne skelne de enkelte dannede sprækker fra naturlige sandindslag og fra hinanden.

På blandingsanlægget er der monteret en trykmåler der løbende logger fraktureringstrykket (monteret for enden af det blå rør til højre i højre billede). Under fraktureringen sker der hævnning af jordlagene over fraktureringsdybden. Der er derfor opsat et monitoringsnet omkring fraktureringsboringen for løbende at følge landhævningen under fraktureringen (nettet kan ses som træmålepinde i figur 4). Landhævningen kan ligeledes benyttes til at vurdere udbredelsen af frakturen.

Efterfølgende er der injiceret sporstofblanding som injektionsvæske i frakturerne via fraktureringsboringen.

5 Dokumentationsmetoder

Der er benyttet en række felt- og laboratiemetoder til dokumentation af spredningen af fraktursand og sporstof. Følgende dokumentationsmetoder er benyttet:

Trykmåling: Trykket ved GeoProbe injektionen er noteret for at se tryk variationen over dybden. Under den hydrauliske frakturering er trykket kontinuert loggeret for at opnå kendskab til, hvordan og hvornår leret brydes. Denne viden kan bruges til at vurdere udbredelsen af den hydrauliske fraktur.

Landhævning under frakturering: Landhævning ved hydraulisk frakturering vil ofte afspejle den geometriske og rumlige fordeling af en fraktur omkring fraktureringsboringen.

Kerneprøvetagning: Kerneboringer med løbende udtagelse af kerner med GeoProbe er anvendt til dokumentation af udbredelsen af fraktursand og sporstoffer. Kernerne er delt på langs og den ene halvdel er undersøgt visuelt for tilstedeværelse af fraktursand og/eller sporstoffer i dagslys og under UV-lys. Tilstedeværelsen er dokumenteret ved, at alle områder indeholdende sporstof er fotograferet under UV-lys samt i dagslys. Sammenhæng med geologiske forhold er vurderet ved efterfølgende geologisk karakterisering/beskrivelse af hver kerne. Endelig er sporstofkoncentrationer for fluorescein og rhodamin WT i delprøver fra den anden kernehelvdel kvantificeret på GGUN-FL02 fluorometer for dokumentation af udbredelse og massebestemmelse.

Udgravning: Ved udgravning af de øvre 4-5 m undersøges sprække og/eller sporstof udbredelse og sammenhæng med geologiske forhold i den øvre del af lagserien mere detaljeret og her dokumenteres udbredelse ligeledes ved fotografering i dagslys og under UV-lys. Udgravninger udføres som transekter gennem injektions- eller fraktureringsboringer og for hydrauliske frakturer endvidere med udgangspunkt i landhævningen.

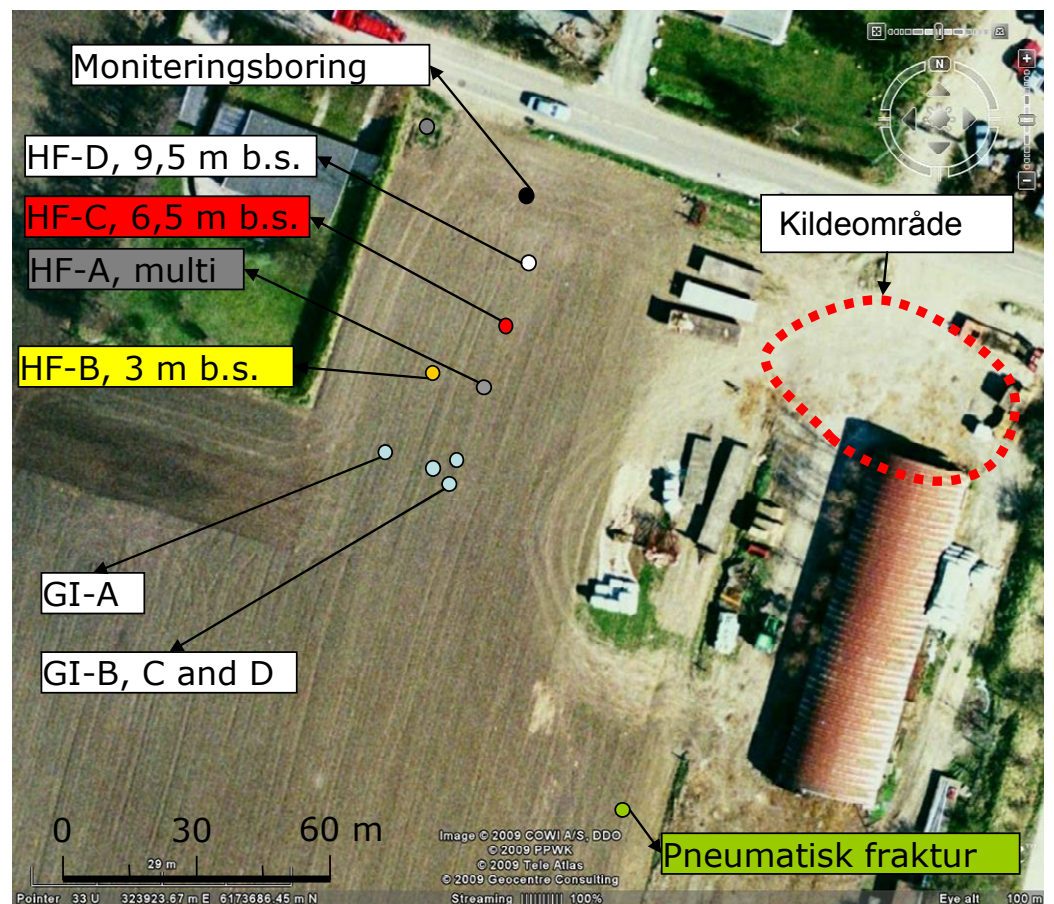
Moniterings- og geoteknikboring: Monitering for sporstoffer i boring til det sekundære grundvandsmagasin nedstrøms testfeltet anvendes til vurdering af om reaktive stoffer og evt. specifikke nedbrydere kan spredes til magasinet.

Triaksial forsøg: Bestemmelse af de geotekniske parametre K_0 -konsolidering ved triaksialforsøg på intakte kerner fra fraktureringsdybderne anvendes til vurdering af sammenhængen mellem frakturers udvikling/retning og de geotekniske parametre med henblik på fremadrettet at kunne vurdere potentialet for frakturering på andre moræners lokaliteter.

6 Strategi

Forureningen på Vadsbyvej findes primært i moræner indtil ca. 15 m u.t. (figur 2). Potentielt kan forureningen oprensnes ved kemiske eller biologiske *in-situ* oprensningsmetoder ved injektion af reaktive stoffer. Den overordnede strategi er derfor at opbygge forsøgene således, at resultaterne direkte kan benyttes ved en eventuel oprensning med tilsætning af reaktive stoffer.

Hydraulisk frakturering og direkte injektion med GeoProbe er i dette projekt afprøvet på lokaliteten i Vadsby. Testfelterne er beliggende uden for det forurenede areal og nær det tidligere testfelt for pneumatisk frakturering. Placeringen af de to testfelter (hydraulisk frakturering (HF) og direkte injektion med GeoProbe (GI)) kan ses i figur 5.



Figur 5: Oversigt over Vadsbyvej lokaliteten. De hydrauliske frakturer er markeret med HF og de direkte injektioner med GeoProbe er markeret med GI.

For at undersøge den eventuelle spredning af reaktive stoffer ved metoderne er sporstoffer med forskellige egenskaber benyttet: brilliant blue (synlig i dagslys), fluorescein (fluorescent, mobil) og rhodamine WT (fluorescent, sorberende). Formålet med at benytte disse sporstoffer var at se hvordan spredningen sker initielt. De injicerede koncentrationer var: fluorescein 10.000 mg/l, Rhodamine WT 2.000 mg/l og brilliant blue 10.000 mg/l.

6.1 Direkte sonde-injektion med GeoProbe

Ved direkte sonde-injektion med GeoProbe, injiceres de reaktive stoffer direkte i undergrunden under tryk. Formålet med GeoProbe injektionsforsøgene på Vadsbyvej var at:

1. Dokumentere transportradius omkring ét Geoprobe injektionspunkt for flere forskellige dybder.
2. Dokumentere den vertikale fordeling af sporstof omkring ét GeoProbe injektionspunkt for flere forskellige dybder.
3. Dokumentere sporstoffordelingen i et injektionsområde på 10m² med flere GeoProbe injektionspunkter og med injektion i flere forskellige dybder.

For at opnå dette er udført:

- En enkelt Geoprobe injektionspunkt med injektioner for hver 25 cm i dybdeintervallerne 2,5-3,5 m, 6-7 m og 8,5-9,5 m u.t. (GI-A på figur 5)
- En klynge med 3 Geoprobe injektionspunkter med injektioner for hver 25 cm i dybdeintervallerne 2,5-3,5 m, 6-7 m og 8,5-9,5 m u.t. i 2 af injektionspunkterne mens der blev udført injektioner for hver 10 cm i 6-7 m u.t. intervallet på bekostning af det øvre interval i det sidste punkt. (GI-B, -C og -D på figur 5)

Til dokumentation er følgende metoder anvendt:

- Trykmåling
- Kerneprøver for hele dybden i afstande på 0,5-2 m i flere retninger fra injektionspunkterne fra begge testfelter
 - i. Beskrivelse og foto i dagslys og UV-lys
 - ii. Analyse af delprøver for sporstoffer
- Udgravning af øvre del (2.5-4.5m u.t.) af klynge testfeltet
 - i. Beskrivelse og foto i dagslys og UV-lys

En nærmere af udførelsen af GeoProbe injektionsforsøgene kan ses i bilag 2.

6.2 Hydraulisk frakturering

Ved hydraulisk frakturering etableres en sandfyldt fraktur, hvori reaktive stoffer kan tilsættes. Hydraulisk frakturering kan benyttes med to forskellige formål:

- A. Etablering af flere horisontale frakturer over dybden i det forurenede område, hvor der kan injiceres sporstof så diffusionsbegrænsningerne kan minimeres.
- B. Danne et net af frakturer under det forurenede område, hvor der injiceres sporstof, og frakturerne fungerer som horisontal barriere.

Ved de hydrauliske tests på Vadsbyvej er anvendelsen af hydrauliske frakturer til begge formål søgt belyst ved, at:

1. Dokumentere mulige sprækkeafstand/densitet (A).
2. Dokumentere mulige sprække radius og form (B).
3. Dokumentere spredningen af sporstof i hydrauliske frakturer.

For at opnå dette er udført:

- Tre enkelte hydrauliske frakturer i 3 m, 6,5 m og 9,5 m u.t. fra hver sin fraktureringsboring (HF-B, -C hhv. -D i figur 5).
- Fire hydrauliske frakturer med indbyrdes afstand på 25 cm i intervallet 6,25-7,00 m u.t. udført fra samme fraktureringsboring (HF-A i figur 5).
- Injektion af sporstoffer i de etablerede frakturer.

Til dokumentation er følgende metoder anvendt:

- Trykmåling
- Landhævning
- Kerneprøver i flere retninger fra fraktureringsboringerne HF-A, HF-C og HF-D
 - i. Beskrivelse og foto i dagslys og UV-lys
 - ii. Analyse af delp prøver for sporstoffer
- Udgravning igennem fraktur HF-B
 - i. Beskrivelse og foto i dagslys og UV-lys

En nærmere beskrivelse af udførelsen af forsøg med etablering af hydrauliske frakturer med sporstofinjektion kan ses i bilag 11.

7 Resultater – Direkte injektion med GeoProbe

I det følgende beskrives udbredelsen af sporstof med henblik på at vurdere transportradius og den vertikale fordeling i flere dybder rundt om et enkelt injektionspunkt og i et klynge injektionsfelt. Alle GeoProbe injektioner er lavet med et starttryk på ca. 25 bar. Ved afslutningen af injektionen er trykket typisk faldet med 2-4 bar (bilag 5).

7.1 Enkelthinjektion

Der er udtaget 10 kerner rundt om enkelt injektionspunktet. Placeringen af kernerne kan ses i figur 6 og bilag 3. I bilag 3 findes endvidere en beskrivelse af selve kerneanalysen. De eksakte dybder, hvor der er fundet sporstof findes i bilag 6 og i bilag 20 findes et eksempel på, hvordan optegningen af sporstof er lavet.

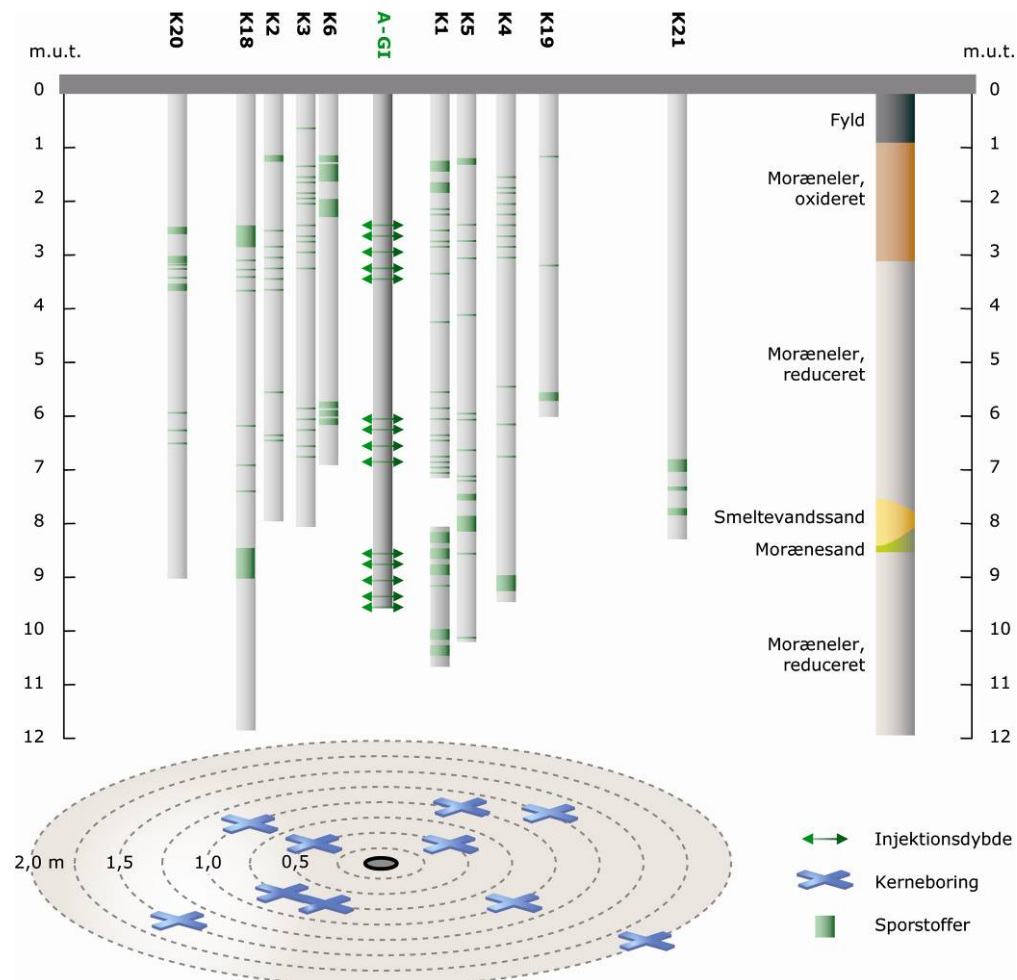
Ud fra kernebillederne i dagslys og under UV-lys og kernebeskrivelserne er der for hver kerne lavet en optegning af hvilke dybder, der er fundet sporstof i. Optegningen er lavet ud fra tykkelsen af det fluorescerende område (fluorescein, mobil). Det bør bemærkes at figuren ikke tager højde for koncentrationsforskelle mellem de påvirkede områder. Spredningen af sporstoffer i kernerne udtaget rundt om enkelt injektionspunktet er skitseret i figur 6. For at få et bedre kendskab til sammenhængen mellem geologi og spredningen af sporstoffer er den geologiske sammensætning i kernerne vist (figur 6). To tværsnit gennemfeltet kan ses i bilag 9. Endvidere er kernerne sorteret i forhold til afstand til injektionspunktet i bilag 9.

Ved injektion (2,5-3,5 m u.t.) over og omkring redoxgrænsen (3-3,6 m u.t.) er sporstofferne spredt i flere dybder, end der er injiceret i. Alle injektionsdybder kan genfindes i en afstand på 1 m fra injektionspunktet. Flere kan også genfindes i 1,5 m.

Sporstofferne træffes i denne zone omkring redoxgrænsen ofte i de mange naturlige horisontale sprækker (smalle bånd), subvertikale sprækker (bredere bånd) og makroporer. Enkelte steder skyldes det bredere bånd mere sandede partier.

Ved injektion i større dybder (6-7 og 8,5-9,5 m u.t.) under redoxgrænsen kan alle injektionsdybder genfindes i en afstand på 0,5 m. Enkelte steder ses der en tendens til, at sporstof træffes lidt højere i formationen end injektionspunktet ved lidt større horisontal afstand fra dette. Flere har en større udbredelse (op til 2 m og derover). Der er i nogle tilfælde truffet sporstof dybere end det dybeste injektionsinterval.

Sporstofferne træffes omkring injektionsintervallet i 6-7 m u.t. fortrinsvis som meget smalle bånd i horisontale sprækker i fast moræneler, som synes at være induceret af fraktureringen, idet der ikke er synlige tegn (i form af udfældninger/oxidation i sprækkerne) på, at de skulle være naturlige. De smallere bånd synes at have en større horisontal udbredelse, hvilket kan stemme med at den injicerede sporstofopløsning når længere når den fordeles i færre og smallere bånd/sprækker. Der er imidlertid også kerner fra dette interval, hvor der ses flere bånd af sporstof end antal af injektioner. Det er ikke umiddelbart muligt at vurdere, om dannede sprækker splittes op, eller om der delvist er tale om naturlige sprækker. Observationerne dokumenterer, at det selv i fast moræneler er muligt at injicere og horisontalt sprede reaktive stoffer ved direkte injektion med GeoProbe, og at opskydning langs sonden ikke synes at udgøre noget væsentligt problem.

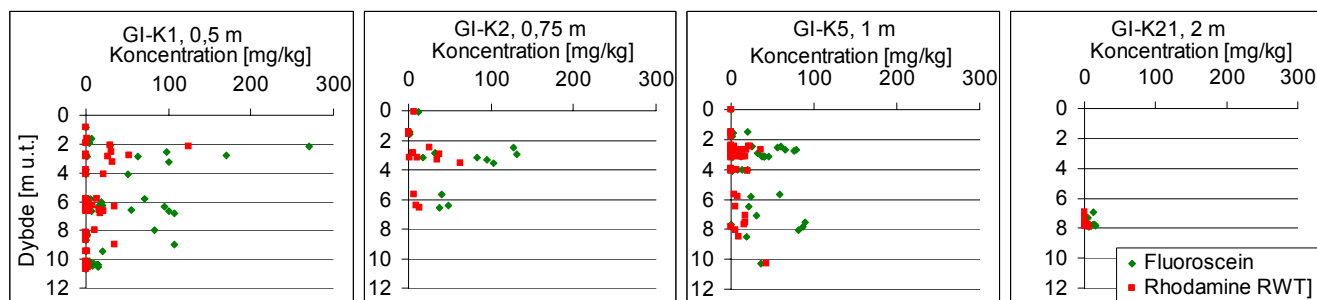


Figur 6: Spredning af sporstoffer i kernerne udtaget rundt om enkelt injektionspunktet GI-A. Til højre er en konceptuel model af den geologiske sammensætning vist (den geologiske sammensætning i de enkelte kerner kan ses i bilag 7).

Der er ikke spredt sporstoffer i smeltevandssandlaget. Under sandlaget træffes sporstofferne ofte i bredere bånd. Dette kan tyde på, at de er spredt i flere tætliggende sprækker (naturlige eller dannede) eller mere permeable zoner i moræneleren i den øvre del af den nedre morænelersaflejring.

Koncentrationer af sporstofferne fluorescein og rhodamine er målt i de fleste kerneprøver i enkeltinjektionsfeltet (bilag 8). I figur 7 ses de målte koncentrationer i de fluorescerende områder i kernerne GI-K1, GI-K2, GI-K5 og GI-K21 der er udtaget i henholdsvis 0,5, 0,75, 1 og 2 m afstand fra injektionspunktet. Alle målte koncentrationer kan ses i bilag 8.

Koncentrationerne af sporstoffer er faldende med afstanden til injektionspunktet. Tæt på injektionspunktet (0,5 m) er det målt fluoresceinkoncentrationer på op til ca. 280 mg/kg, hvor koncentrationerne i 2 m afstand er nede på ca. 20 mg/kg. Rhodamin koncentrationen i både 0,5, 0,75 og 1 m afstand til injektionspunktet ligger på op til 40 mg/kg. I 2 m er koncentrationen væsentlig lavere (<7mg/kg).



Figur 7: Målte koncentrationer af fluorescein og rhodamine i kernerne GI-K 1, GI-K2, GI-K5 og GI-K21 fra enkelt injektionspunktet.

7.2 Klyngefelt

Vurdering af spredningen af sporstof i klyngefeltet er udført ved tilsvarende metode som benyttet for enkelt injektionspunktet. Den geologiske sammensætning og spredningen af sporstoffer er vist gennem et tværsnit i figur 8. I bilag 7 ses den geologiske sammensætning i hver af kernerne. I bilag 10 er et tværgående tværsnit, samt en sortering af kernerne i forhold til, hvor mange injektionspunkter de forventes at være påvirket af, vist.

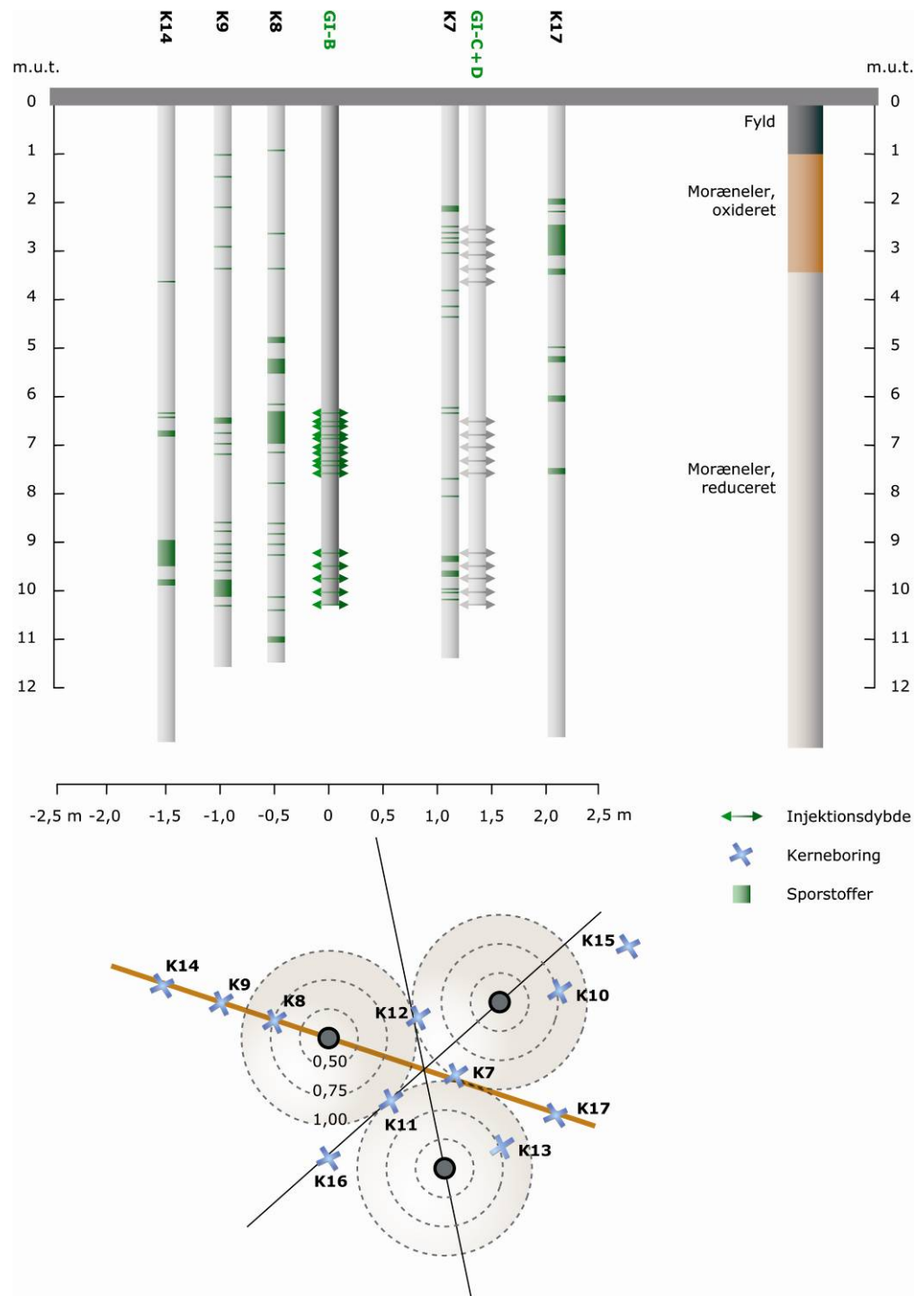
Der er fundet sporstoffer i flere dybder over redoxgrænsen i kernerne GI-K14, -9 og -8. Da der ikke er injiceret over redoxgrænsen i GI-B, tyder det på at sporstof er transporteret fra GI-C og -D. I kernerne GI-K7 og -K17, der ligger henholdsvis 0,75 og 1 m fra de to injektionspunkter, kan alle injektionsdybder over redoxgrænsen genfindes.

I GI-B er der lavet injektioner med 10 cm interval fra 6 til 7 m. I GI-K8, der er udtaget 0,5 m fra injektionspunktet, genfindes stort set alle injektionsdybder. I en afstand på 1 m er halvdelen fundet. Sammenlignes dette med dybderne, hvor der er fundet sporstof i GI-K10 og -K15, ses tendens til at der er skabt flere sprækker ved injektion med 10 cm interval. Imidlertid var der ligeså mange bånd af sporstof i enkelte kerner fra enkelt injektionsfeltet, hvor injektionsafstanden var 25 cm. Der er ikke tegn på at injiceret tracer /dannede frakturer i væsentlig grad styres af hinanden / løber sammen i umiddelbar nærhed af injektionspunktet selv ved de meget tætte injektioner.

I det dybe injektionsinterval (6-7 og 8,5-9,5 m u.t.) genfindes alle injektionspunkter ud i minimum 1 m afstand fra injektionspunktet. Der ses i dette interval flere (sub)vertikale spredninger af sporstof i kernerne, hvilket indikerer, at naturlige subvertikale frakturer aktiveres og medvirker til spredningen (bilag 7). Dette er lovende for oprensning, da det tilsyneladende ikke i væsentlig grad reducere den horisontale udbredelse.

Alle injektionsdybder genfindes i de 3 kerner (GI-K7, -11 og -K12), der forventes at være påvirket af alle 3 injektioner. Spredningen synes tilsvarende den spredning, der ses i kerner, der er påvirket af 1 injektionspunkt. Der er således opnået et godt overlap mellem sporstof injiceret fra de 3 injektionspunkter, hvilket betyder afstanden er tilstrækkeligt lille mellem injektionspunkterne.

Ved anden og tredje injektion observeredes nogen opskydning af sporstof langs sonden, men mængden vurderedes at være beskeden. Det kan dog ikke udelukkes, at det også har haft betydning for udbredelsen.



Figur 8: Spredningen af sporstof i kernerne fra et tværsnit gennem klynge injektionsfeltet.

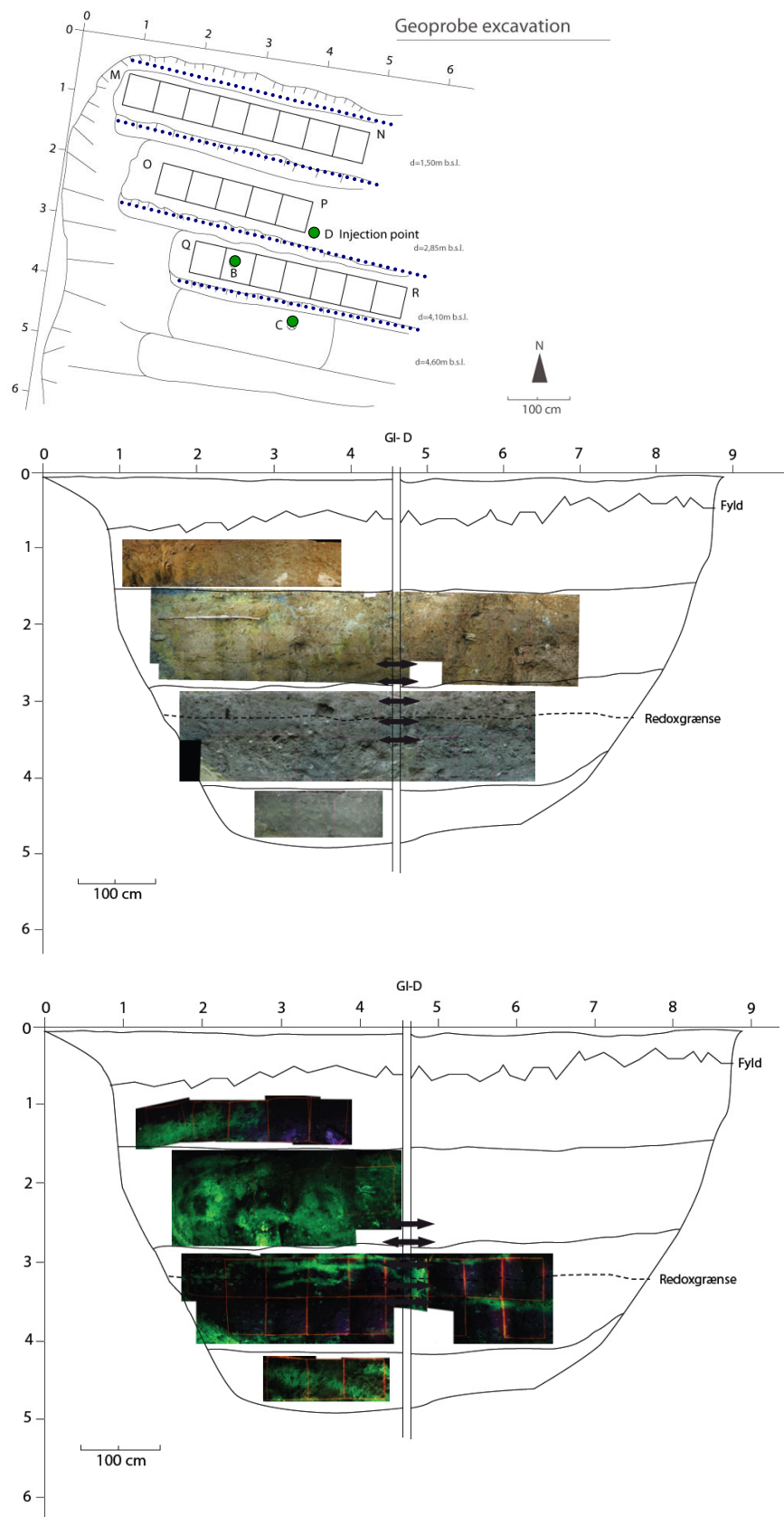
Ved at betragte enkelt injektionspunktet og det første injektionspunkt i klyngefeltet findes en udbredelse på 1 m af alle injektionspunkter. Ved anden og tredje injektion opnås der kun en udbredelse på 0,5-0,75 m. Dette tyder på at sprækkerne fra første injektion leder sprækkerne, der dannes ved de efterfølgende injektioner. Hvilket bekræftes af, at der sås sporstof opkydning via de tidligere etablerede injektionspunkter i klyngen. Sandsynligvis kan der opnås en mere ensartet spredning omkring de enkelte injektionspunkter ved at øge afstanden mellem efterfølgende injektioner, og dermed opnå en samlet større udbredelse fra klyngen. Begrænsningen ligger i at bevare et overlap.

En plantegning af udgravningen af klyngefeltet kan ses i bilag 4. I udgravningen blev den geologiske sammensætning og spredningen af sporstoffer undersøgt på både horisontale og vertikale flader på den nordlige del af udgravningen til knap 5 m u.t. I figur 9 er vist et tværsnit gennem udgravningen med spredningen af sporstof (dagslys og UV-belysning). Injektionsdybderne er markeret på figuren.

Ved dagslys ses brilliant blå tydeligt over redoxgrænsen (3-3,5 m u.t.), som indikation på at der er spredt sporstoffer i sedimentet, hvor det ved dagslys er svært at identificere spredning under redoxgrænsen. Under UV-belysning ses sporstofferne tydeligt både over og under redoxgrænsen. Sporstofferne er spredt ud i minimum 2,5 m afstand fra injektionsboringen både over og under redoxgrænsen. Over redoxgrænsen er sporstofferne spredt forholdsvis jævnt ud i sedimentet via naturlige sprækker, bioporer og ormegange. Under redoxgrænsen findes sporstofferne primært i sammenhængende horisontale/subhorisontale sprækker, der sandsynligvis er initieret under injektionen.

Der findes sporstoffer både over og under injektionsintervallet. Der synes at være en tendens til, at sporstofferne, der er injiceret i intervallet fra 2,5 til 3,5 m u.t., overvejende er spredt over og omkring redoxgrænsen. Sporstofferne, der ses i nederste del af udgravningens side (ca. 4-5 m u.t.) under injektionsintervallet, synes at have en subhorisontal udbredelse fra samme eller lidt større dybde. Da der ikke er injiceret i dette interval, formodes sporstofferne at kunne stamme fra injektionsintervallet i 6 til 7 m u.t. og være transporteret via naturlige sub-vertikale sprækker eller evt. delvis langs sonden til observationsdybden.

Sandlinser med kontakt til sprækker og andre makroporer med sporstoffer var fyldt med sporstof. Lokalt kan en betydelig andel af massen af sporstof således optræde i indlejrede sandlinser.



Figur 9: Oversigt af udgravningen af klyngefeltet (øverst), samt vertikale profiler af udgravningen. (midt) Billeder taget ved dagslys. (nederst) Billeder taget under UV-lys.

7.3 Direkte injektion med GeoProbe, opsummering

Over redoxgrænsen:

- Transportradius:
 - Alle injektionspunkter er fundet i en afstand på ca. 1,25 m fra injektionspunktet.
 - Flere injektionsdybder er fundet i en afstand på 2 m fra injektionspunktet.
 - Ved udgravningen er der fundet en transportradius på ca. 2,5 m rundt om injektionspunktet GI-D. Punktet kan være påvirket af injektionen i GI-C.
- Vertikal fordeling:
 - Sporstofferne fordeles over flere dybder end det er injiceret i på grund af tilstedeværelsen af naturlige sprækker, bioporer og rodhuller.
 - Sandlinser optager store mængder sporstoffer.

Under redoxgrænsen:

- Transportradius:
 - Injektionerne med 25 cm interval kan genfindes 1 m fra injektionspunktet ved første injektion. Ved følgende injektioner er sporstofferne transporteret ca. 0,5-0,75 m fra injektionspunktet.
 - Alle injektionsdybder fra 10 cm interval injektionen kan genfindes 0,5 m fra injektionspunktet.
 - Alle injektionspunkter er genfundet i kerner der forventes påvirket af alle tre injektionspunkter.
- Vertikal fordeling:
 - Sporstofferne er genfundet signifikant dybdere end det er injiceret i.
 - Der er en god vertikal fordeling i kerner påvirket af 3 injektionspunkter.
 - Transporten synes overvejende at være sket i sprækker skabt under injektionen af sporstoffer.

Dokumentationsmetoder

Til dokumentation af direkte injektion med sonde er udgravning og kerneprøvetagning udført. De udtagne kerner giver et godt indblik i spredningen af sporstoffer over dybden, hvor den horisontale udbredelse vurderet på baggrund af kerneprøver er mere usikker. Den horisontale udbredelse blev derimod observeret ved udgravningen, hvor den blev fundet større end først vurderet ud fra kerneprøver. Der er dog en begrænsning ved udgravning i forhold til dybden, hvor det kun sikkerhedsmæssigt var muligt at udgrave til en meter under redoxgrænsen. Vurderingen af den horisontale udbredelse af injektionsdybder under redoxgrænsen er derfor baseret på kerneprøver.

8 Resultater - Hydraulisk frakturering

Der er udført hydrauliske frakturer i tre dybder: 3, 6,5 og 9,5 m u.t. Derudover er der lavet en multifraktur med 4 tætliggende frakturer, udført fra en fraktureringsboring. I tabel 1 ses farven på hver fraktur sammen med den benyttede mængde af både fraktur-sand og sporstof. Blandingsforhold af guar, borax og breaker og benyttede flow ved fraktureringerne kan ses i bilag 11. Sporstoffet er injiceret med et flow på 6-7 l/min og et tryk på 1-2 bar. Under fraktureringerne er landhævningen målt. Strategien for måling af landhævningen kan ses i bilag 15.

Efter fraktureringen er der injiceret sporstoffer i frakturboringerne (mængderne fremgår af Tabel 1). Sporstofferne blev injiceret med et anlæg opbygget af Arkil A/S i samarbejde med GeoSyntec og COWI (se figur 10). Anlægget bestod af en palletank, hvori sporstofferne blev blandet. Palletanken var forbundet med en pumpe, hvor tryk og flow kunne styres. Der blev injiceret med en tryk på 1-2 bar.

Tabel 1: Farve og mængde på epoxyfarvet sand ved hver fraktur. Endvidere ses mængden af tilsat sporstof.

Dybde af fraktur [m u.t.]	Epoxyfarvet sand	Mængde af fraktureringssand [kg]	Sporstofmængde [l]
Enkelt frakturer			
3	Gul	350	250
6,5	Rød	350	250
9,5	Hvid	350	0
Multifraktur			
6,25	Grøn	300	750
6,50	Rød	300	
6,75	Hvid	300	
7,00	Gul	300	

Kernerne rundt om de hydrauliske frakturer er placeret ud fra den størst observerede landhævning under og efter fraktureringen. Både rundt om de hydrauliske frakturer og ved GeoProbe injektionerne er kerneboringer så vidt muligt placeret i tværgående profiler for at opnå kendskab til den rumlige fordeling.



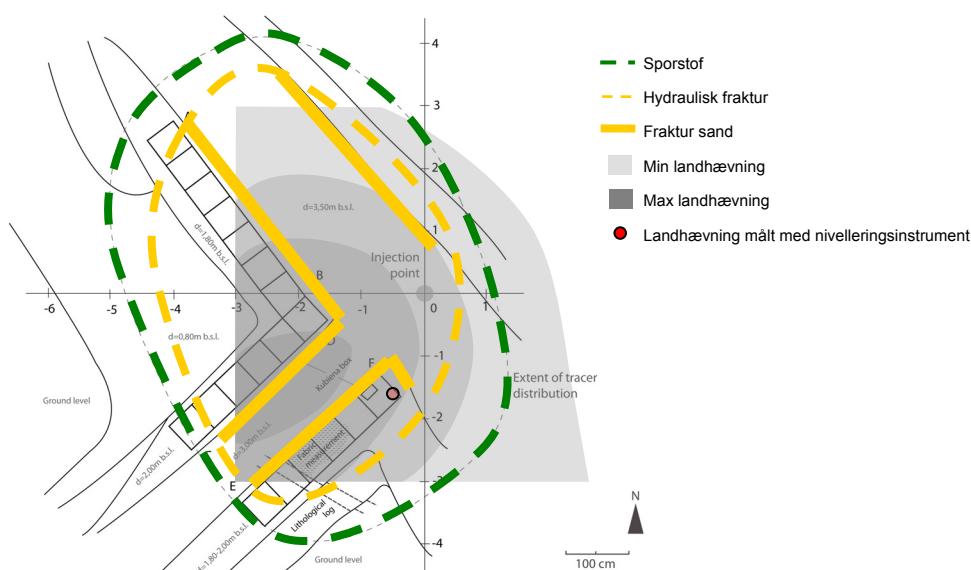
Figur 10: Injectionsanlægget til injection i fraktureringsboringer.

8.1 Hydraulisk fraktur i 3 m u.t.

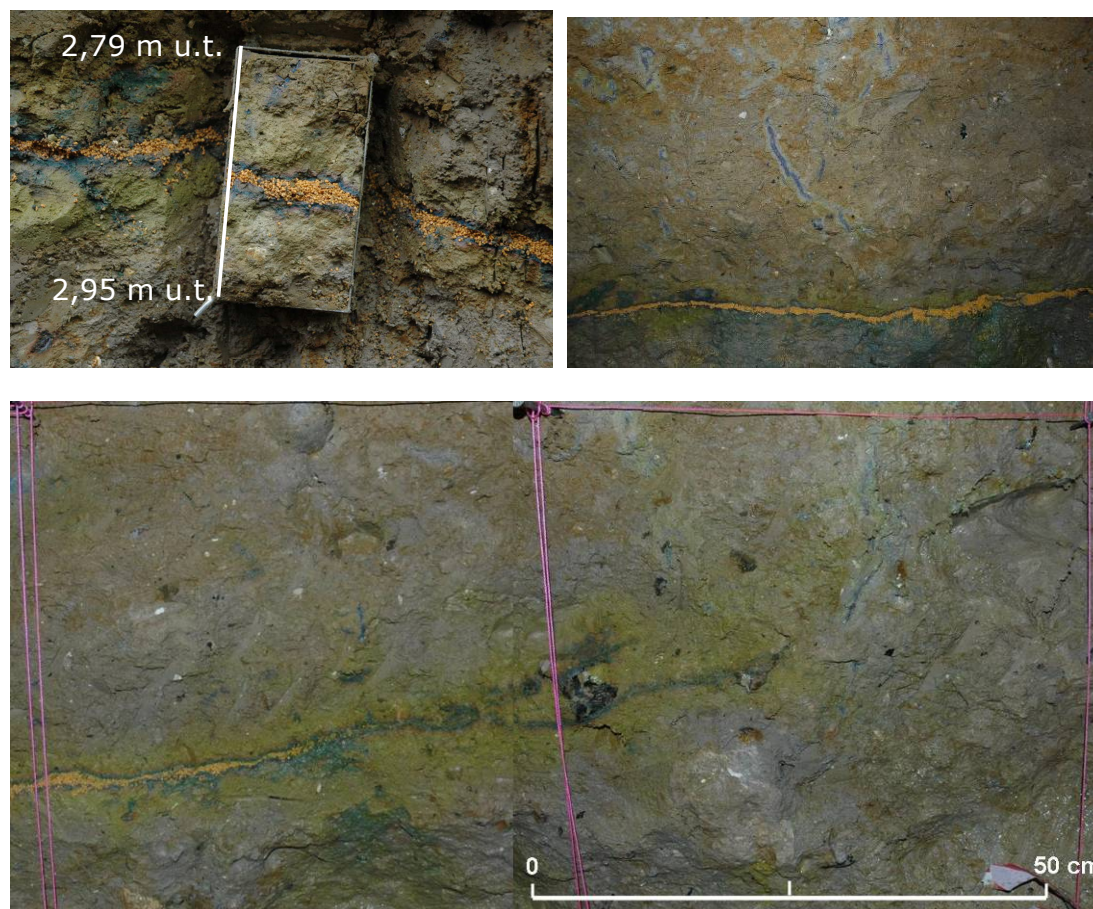
Udbredelsen af den hydrauliske fraktur i 3 m u.t. er undersøgt ved at betragte fraktureringstrykket, landhævnungen under fraktureringen og ved at lave en udgravning til ca. 3,5 m u.t. (plantegning af udgravning kan ses i bilag 13). Ud fra fraktureringstrykket forventes det at en bowleformet fraktur er dannet (bilag 14). I udgravningen er den geologiske sammensætning og spredningen af sporstoffer vurderet.

Udbredelsen af den hydrauliske fraktur er ca. 4 m fra fraktureringsboringen i nordvestlig, vestlig og sydvestlig retning (figur 11). Udbredelsen mod øst forventes kun af være ca. 1 m. Diameteren på frakturen er ca. 6-6,5 m, hvor den er størst (nord til syd). Fra vest mod øst er udbredelsen ca. 5 m. Betragtes landhævnungen er den største landhævning fundet sydvestlig retning. Ca. 1,5 m fra fraktureringsboringen i sydlig retning blev landhævnungen målt til 1,6 cm med nivelleringsinstrument (David White 3100). Ud fra observationer under udgravningen blev frakturen også fundet tykkest i denne retning (figur 12).

Sporstofferne er spredt ca. 50 cm længere ud end sprækken (se afslutning af sprække i figur 12). Mod enden af sprækken bliver frakturen tyndere, og til sidst er det kun sporstoffer, der er spredt i leren. For enden sprækken udbredes sporstofferne i en skålførmig facon opad mod overfladen i naturlige sprækker og bioporer (figur 12). Flere steder over sprækken er der også udbredelse af sporstof via naturlige sprækker og bioporer (figur 12). Der synes dog at være stor variation i denne udbredelse, da der i nogle områder ingen vertikal spredning er fundet.



Figur 11: Udbredelsen af den hydrauliske fraktur i 3 m u.t.



Figur 12: (øverst v) Kubiena boks udtaget hvor sprækken er tykkest. (øverst h) Den hydrauliske sprække og spredningen af sporstoffer i naturlige bioporer og sprækker. (nederst) Enden af den hydrauliske fraktur, hvor det kan ses at sporstofferne er spredt længere ud end frakturen. Endvidere anes den skålformede udbredelse af sporstofferne ved enden af sprækken i højre hjørne.

8.2 Hydraulisk fraktur i 6,5 m u.t.

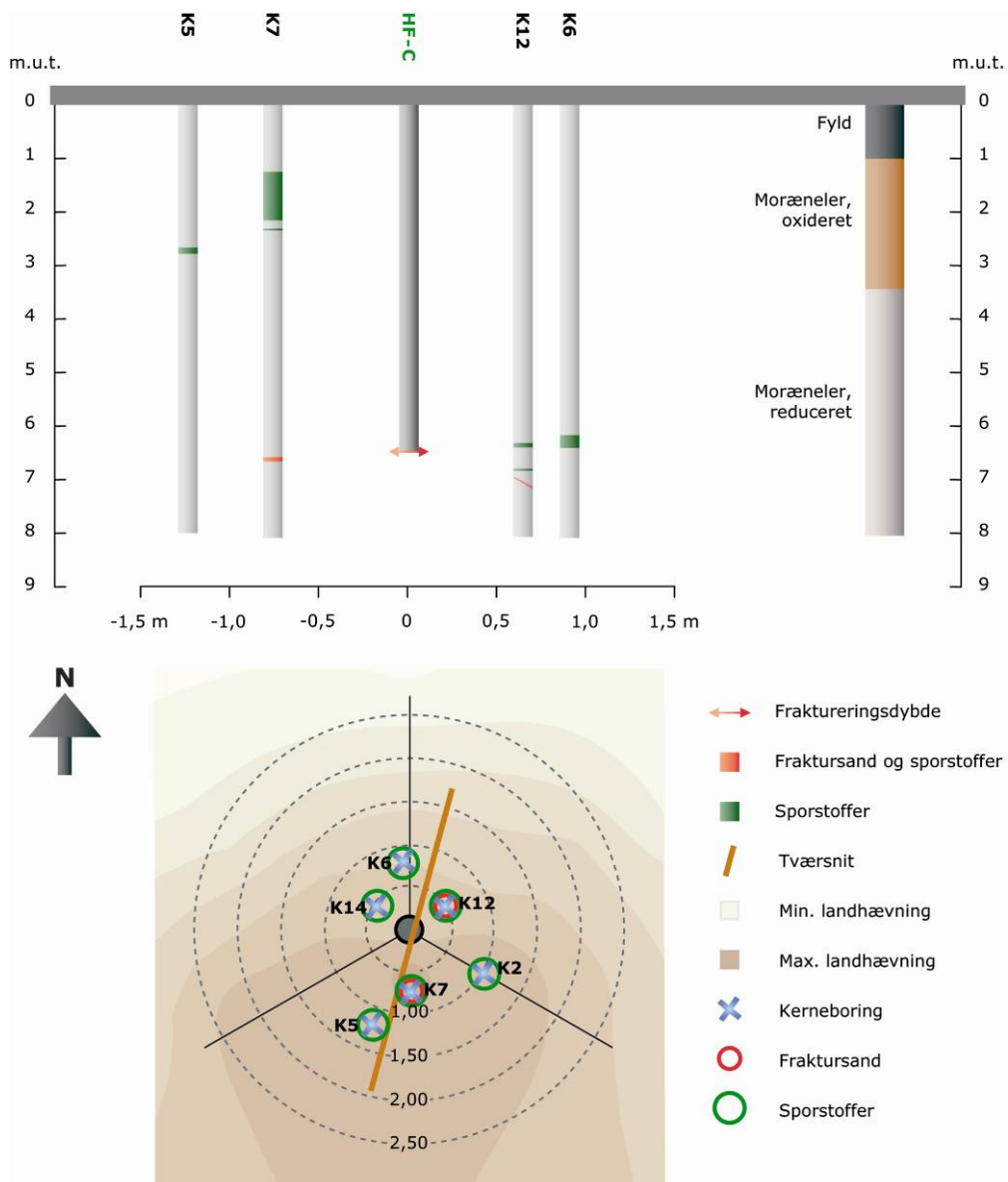
Udbredelsen af den hydrauliske fraktur i 6,5 m u.t. er undersøgt ud fra den målte landhævning, fraktureringstryk og ved udtagning af kerner. Der er udtaget 6 kerner i området ved den hydrauliske fraktur. Eksakte dybder, hvor der er fundet sporstof, kan ses i bilag 16. Den observerede tilstedeværelse af fraktursand og sporstoffer kan ses i figur 13, sammen med landhævningen og placeringen af kerneboringerne omkring fraktureringsskudningen. Endvidere er en grov konceptuel model af den geologiske sammensætning vist (den geologiske sammensætning i hver kerne kan ses i bilag 16).

Ud fra landhævningen forventes frakturen at have en udbredelse mod syd, da den største landhævning er målt i denne retning. Ud fra fraktureringstrykket forventes det, at frakturen er forholdsvis fladt udbredt, da trykket under fraktureringen falder forholdsvis jævnt under fraktureringen (bilag 14).

Den hydrauliske fraktur med sandfyldning er kun fundet i 2 ud af de 6 kerner. I GI-K7 er sprækken flere sandkorn tyk, hvor den i GI-K12 er fundet som enkelte sandkorn i lermatricen (bilag 19). Dog er der målt tilsvarende og højere koncentrationer af sporstof i HF-K12 som i HF-K7 (bilag 18).

Der er fundet sporstoffer over redoxgrænsen i flere kerner. Dette kan være tegn på, at der er direkte kontakt fra den hydrauliske fraktur og op til de øvre lag.

Ud fra de tilgængelige resultater er det ikke muligt at vurdere hverken radius eller form af den hydrauliske fraktur. Det er heller ikke muligt at redegøre for, hvor den store mængde (350 kg) fraktursand, der er anvendt, er lokaliseret.

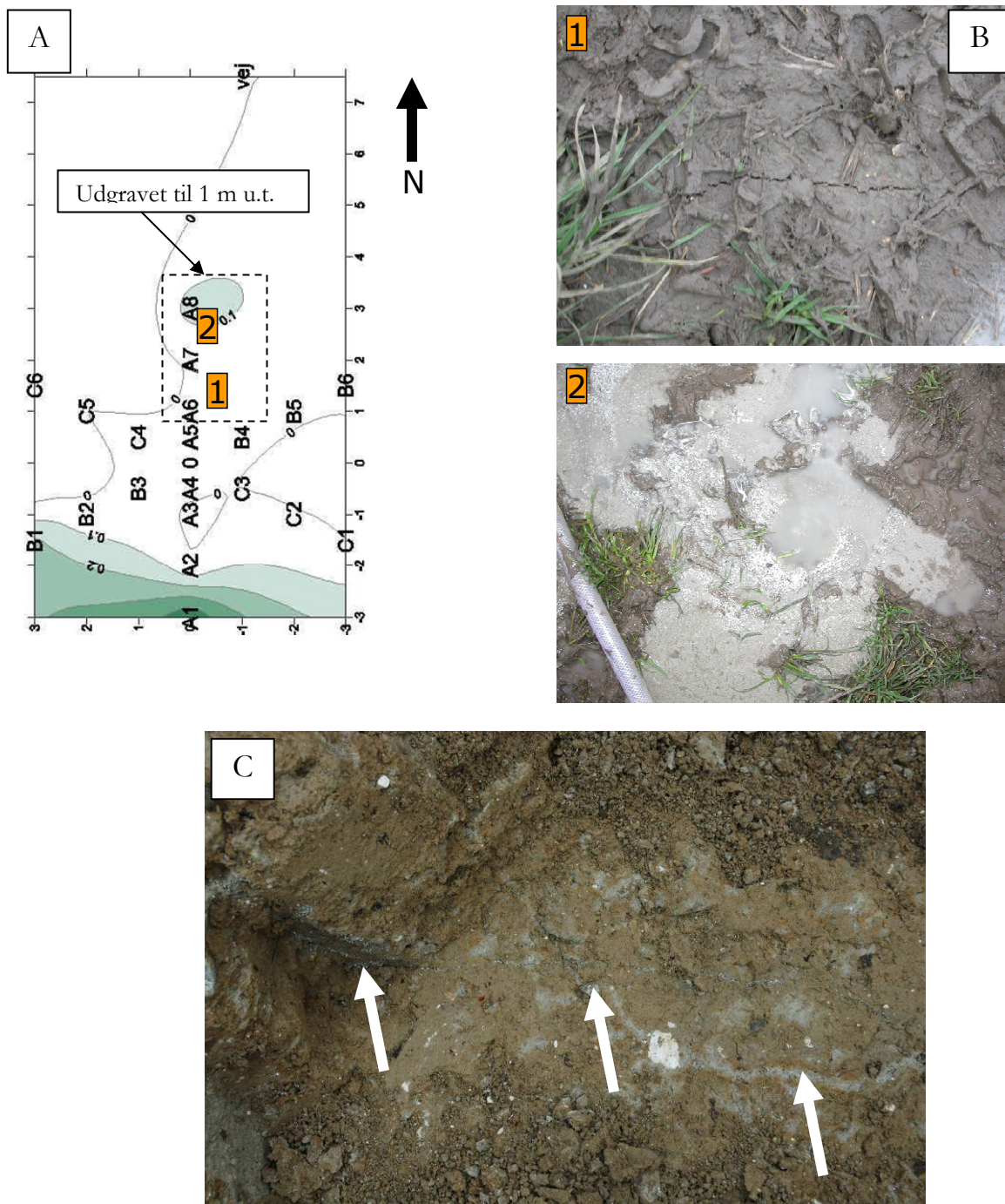


Figur 13: Udbredelsen af den hydrauliske fraktur i 6 m u.t. Ved siden af ses en konceptuel fremstilling af geologien i kernerne (den geologiske sammensætning i hver af kernerne kan ses i bilag 17).

8.3 Hydraulisk fraktur i 9,5 m u.t.

Ved fraktureringen i 9,5 m u.t. blev der efter 21 minutter observeret opskydning til overfladen (figur 14). Dette afspejles tilsvarende i trykkurven der drastisk falder fra 4,5 bar til 1,5 bar (bilag 14). Der er kun målt en lille landhævning i området, hvor opskydningen blev observeret.

For at undersøge, hvorfor frakturen skød mod overfladen er der udtaget to kerner til beskrivelse af den geologiske sammensætning. Der blev dog ikke fundet nogen forklaring ud fra de to kerner. I den øverste meter blev sprækken observeret udbredt i naturlige sprækker (figur 14).



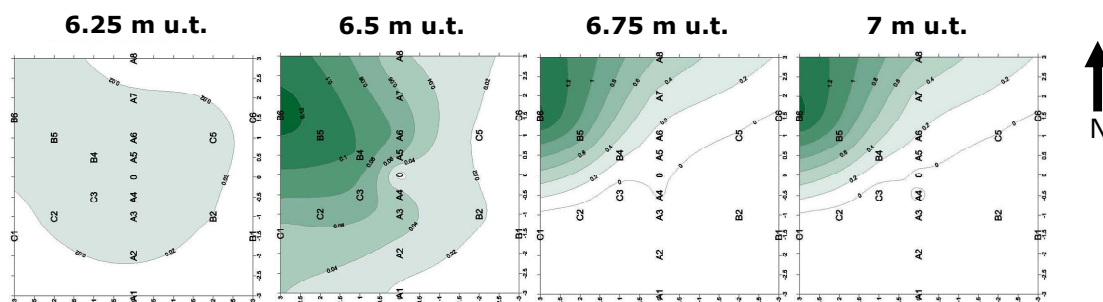
Figur 14: (A) Landhævningen under den hydrauliske frakturering. (B) Billeder af opskydningen til overfladen. Området billedet viser er markeret på (A). (C) Udgravning af hydraulisk sprække til 1 m u.t.

8.4 Hydraulisk multi fraktur – 6,25, 6,50, 6,75 og 7,00 m u.t.

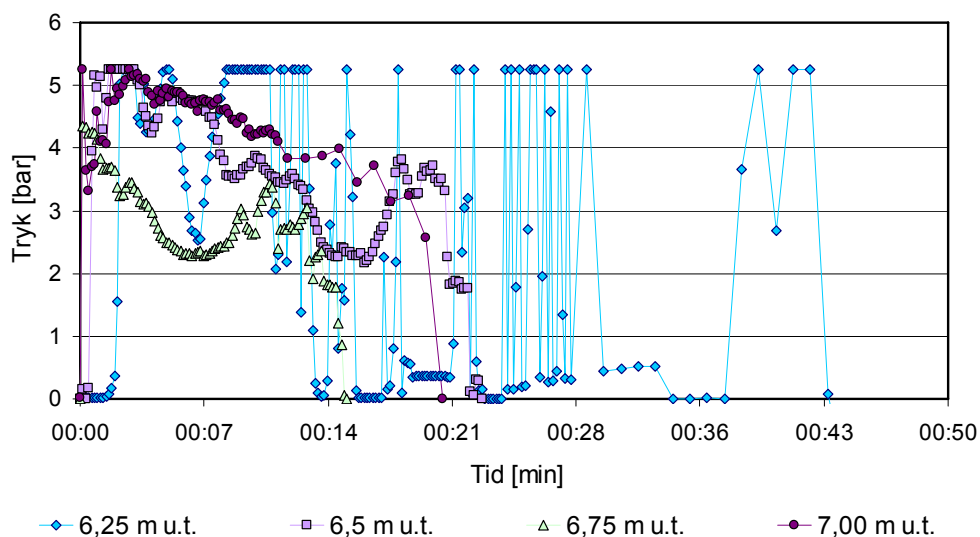
Den hydrauliske multifraktur er etableret med 4 frakturer med 25 cm afstand i intervallet fra 6,25 til 7,00 m u.t. Den øverste sprække blev etableret først og den dybeste sidst.

Der er ikke målt landhævning af betydning under fraktureringen i 6,25 m u.t. (figur 13). Dette kan tyde på en vertikal udbredelse af frakturen. Samme forventning fås ved at betragte trykkurven, der viser et meget svingende tryk under fraktureringen (figur 16).

Frakturen i 6,5 m u.t. forventes ud fra landhævningen at have en udbredelse i nordvestlig retning. Betragtes trykkurven, forventes en vertikal udbredelse af frakturen, da trykket langsomt stiger i de første 5 min, hvorefter det flader mod slutningen af fraktureringen. Ved fraktureringerne i 6,75 og 7 m u.t. er der målt landhævning i samme retning, men i længere afstand fra fraktureringsboringen end for frakturering i 6,5 m u.t. Dette kan tyde på at frakturerne er løbet sammen med frakturen i 6,5 m u.t. og hinanden. Dette er mht. sammenløb af frakturerne i 6,75 og 7 m u.t. i god overensstemmelse med at trykket ved fraktureringen i 7 m u.t. er højere end trykket i 6,75 m u.t.



Figur 15: Den maksimale landhævning målt under fraktureringen af multi frakturen i 6,25, 6,5 6,75 og 7 m u.t. Landhævning er målt fra start af den individuelle frakturering.



Figur 16: Trykudviklingen ved fraktureringen i henholdsvis 6,25, 6,50, 6,75 og 7,00 m u.t.

For at undersøge udbredelsen af de 4 frakturer i multifrakturen er der udtaget 9 kerner omkring fraktureringsboringen (figur 17). Eksakte dybder, hvor der er fundet sporstof, kan ses i bilag 16. Der er målt en koncentrationer varierende fra 20 til 260 mg/kg i kernerne med frakturer (bilag 18).

Frakturen i 6,25 m u.t. er fundet i en kerne HF-K10. Frakturen er fundet som en vertikal sprække gennem kernen fra ca. 6,90 til 7,05 m u.t.(bilag 19). Dette stemmer overens med forventningerne ud fra landhævning og trykdata.

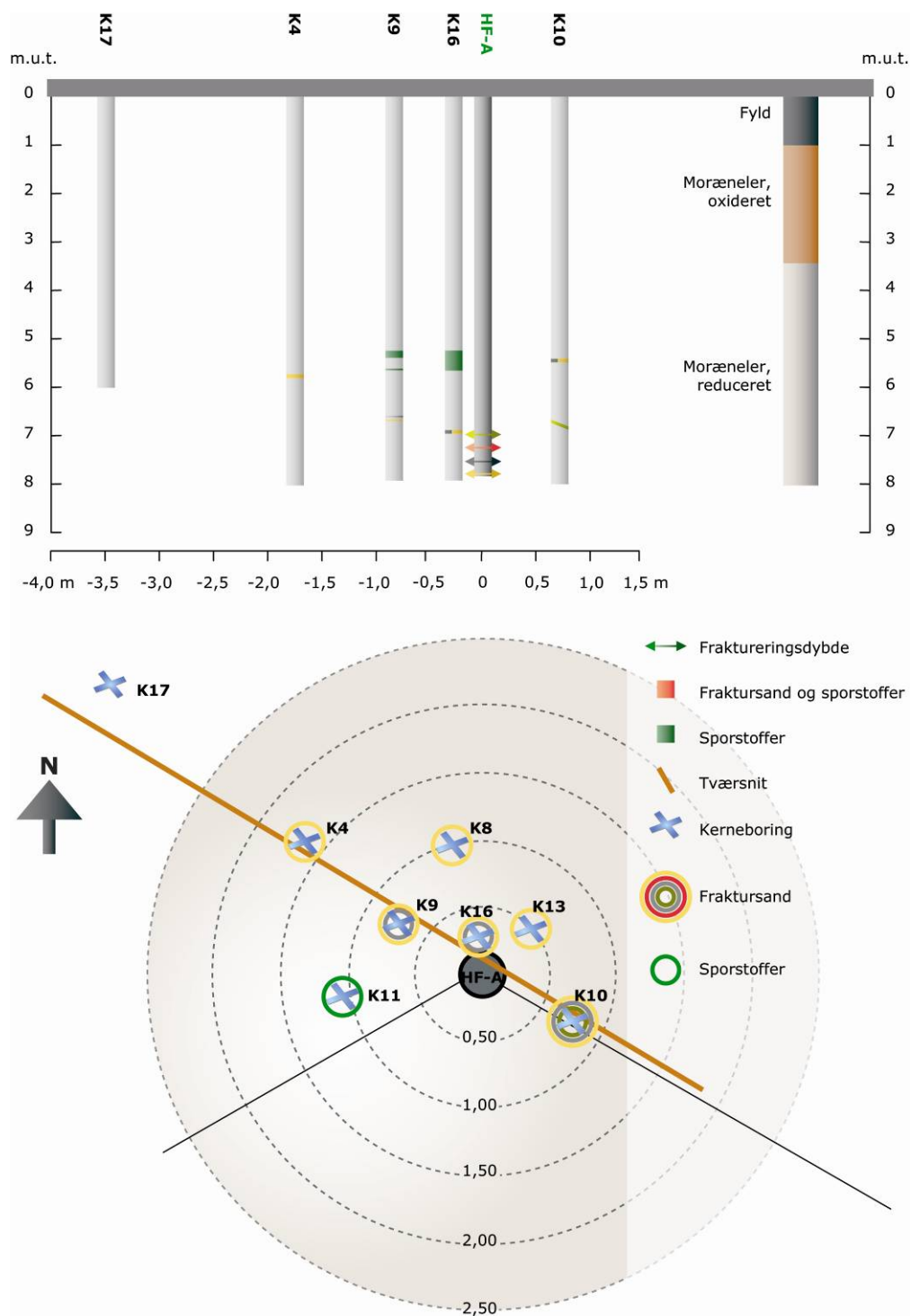
Frakturen i 6,5 m u.t. er ikke fundet i kernerne. Hvis sprækken, som ventet ud fra trykdata, står som en vertikal sprække, kan det være svært at lokalisere sprækken ud fra kerneprover.

Frakturen i 6,75 er fundet i 3 kerner. I de samme kerner er frakturen i 7 m u.t. også fundet. Derudover er frakturen i 7 m u.t. også fundet i 3 andre kerner, dvs i 6 kerner i alt. Et tværsnit gennem fraktureringsområdet kan ses i figur 17.

Hvis frakturer løber sammen, vil den sidste fraktur udbrede sig gennem den foregående og derefter fortsætte udefter, man bør altså finde fraktursand fra den sidste (og nederste) fraktur alene længst ude og sammen med fraktursand fra foregående fraktur nærmere fraktureringsboringen. Dette passer fint mht. observationerne af hvidt og gult sand. Derimod er ikke truffet rødt fraktursand nærmest fraktureringsboringen sammen med de andre fraktursand, som landhævningen måske kunne indikere.

Det har ikke muligt at redegøre for, hvor den store mængde (1200kg) fraktursand, der er anvendt er lokaliseret. Forventningerne til udbredelse af den dybeste fraktur ud fra anvendt mængde fraktursand og sammenløb med anden sprække er, at den bør være større end, areal med kerneboringer, hvor den er observeret. Ud fra landhævning forventes den at være udbredt længere mod nordvest (figur 15). Ud fra en betragtning om at sprækken i 3 m u.t. var tykkest, hvor landhævningen var størst, blev det forsøgt at udtage flere kerner nordvest for fraktureringsboringen. Det var dog ikke muligt at udtage de ønskede kerner, og de to kerner der blev udtaget, nåede ikke den ønskede dybde (8 m u.t.). Der blev ikke truffet fraktursand i de to boringer (HF-K17 og HF-K21) (se figur 15).

Det er ikke lykkedes at etablere 4 individuelle horisontale sprækker med kort indbyrdes afstand. Der er fundet sporstoffer i flere dybder over frakturerne. Dette tyder på, at der er hydraulisk kontakt fra de hydrauliske frakturer til overliggende sprækker eller sandslirer.



Figur 17: Udbredelsen af de hydrauliske frakturer i henholdsvis 6,25, 6,50, 6,75 og 7,0 m u.t. sammen med den geologiske sammensætning (den geologiske sammensætning i hver kerne kan ses i bilag 17)

8.5 Hydrauliske sprækker, opsummering

Over redoxgrænsen:

- Det var muligt at lave en sammenhængende sprække med 3-3,5 m radius.
- Sprækken var på det tykkeste sted ca. 2 cm tyk. Tykkelsen varierede fra flere sandkorns tykkelse centralt i frakturen til enkeltstående sandkorn ved enden.
- Sprækken er asymmetrisk udbredt med skålform.

Under redoxgrænsen:

- Det er muligt at lave en sprække i 6 til 7 m u.t. Det er dog ikke muligt at vurdere udbredelsen af frakturen.
- Det var ikke muligt at lave en sprække i 9,5 m u.t. med den ønskede udbredelse.
- Det var ikke muligt at skabe 4 sprækker med 25 cm over hinanden fra en fraktureringsboring.
- Tykkelsen af frakturerne varierer fra enkeltstående sandkorn til 2 sandkorns tykkelse.

Dokumentationsmetoder

Der er benyttet flere forskellige dokumentationsmetoder til at undersøge den mulige sprækkeafstand/densitet, radius, form og udbredelse af de hydrauliske frakturer og injicerede sporstoffer. Den bedste metode synes at være udgravning, da man her får syn for sagen. Der er fundet god overensstemmelse mellem resultaterne fra udgravningen og forudsigelserne ud fra både landhævning og tryk. Der er dog en begrænsning ved metoden i forhold til dybden, hvorfor de hydrauliske frakturer under redoxgrænsen er dokumenteret ved kerneprøvetagning. Generelt er der fundet god overensstemmelse mellem forudsigelserne ud fra fraktureringstrykket og landhævningen (ved undtagelse af fraktureringen i 6,5 m u.t i multifrakturen), men disse passer ikke i alle tilfælde sammen med resultaterne fra kernerne udtaget ved frakturerne. Det kan dog ikke udelukkes, at der ved at udtage flere kerner kan opnås en bedre sammenhæng. Endvidere kan resultaterne fra triaksial forsøgene (endnu ikke afsluttet) afklare, i hvilke dybder, der præferentielt dannes horisontale og vertikale sprækker.

Generelt vurderes området, hvor landhævningen er målt, for lille i forhold til at opnå et afgrænset område der påvirkes af fraktureringen. Det anbefales derfor ved senere fraktureringer at udvide området.

9 Potentiale for anvendelse til oprensning

I dette kapitel vurderes injektions- og fraktureringsmetoderne i forhold til anvendelse ved oprensning af det forurenede område på Vadsbyvej. Efterfølgende laves en sammenligning af de to metoder med henblik på en mere generel vurdering af deres anvendelighed til oprensning af morænelerslokaliteter (for generel beskrivelse af den forventede forureningsfordeling ved forurening med klorerede opløsningsmidler på en morænelerslokalitet henvises til /14/). Anvendeligheden, for en frakturerings- eller injektionsmetode til oprensning af en forurenede morænelerslokalitet, vurderes ud fra følgende:

- Muligheden for benyttelse i hele det ønskede dybdeinterval for behandling
- Transportradius af sporstoffer fra injektionspunkt/-klynge
- Vertikale fordeling af sporstoffer
- Sprækkeudbredelse og tykkelse
- Forudsigelighed af udbredelse

9.1 Direkte injektion med GeoProbe

Direkte injektion med GeoProbe, vurderes på grundlag af forsøgsresultaterne, at være egnet til at injicere reaktive stoffer i hele det ønskede behandlingsinterval (1-13 m u.t.). Det forventes ikke, at der umiddelbart vil ske spredning af reaktive stoffer eller bakterier til det sekundære grundvandsmagasin, da der ikke er målt sporstoffer i monitoringsboringen, der er placeret nedstrøms test feltet (se placering i figur 5, boreprofil findes i bilag 20).

Generelt ses en spredningsradius på 1 m eller mere for samtlige injektionsdybder i intervallerne og op til 2 m for enkelte af disse. Der vurderes derfor at kunne opnås fine overlap mellem reaktive stoffer fra injektionspunkter placeret med 2 m's afstand.

Senere injektioner ledes af tidligere injektioner, når den indbyrdes afstand er begrænset. Dette bør der tages højde for ved tilrettelæggelse af injektionsstrategi, så en optimal spredning i det forurenede område opnås. Dette kan eksempelvis ske ved at starte med injektioner med dobbeltafstand først og så efterfølgende udfylde mellem dem og afslutte med en ydre krans i periferien af forureningen.

Over og omkring redoxgrænsen (behandling i ca. 1-3,5 m u.t.) giver injektioner med 25 cm interval en tættere vertikal spredning af injicerede stoffer, idet naturlige sprækker og andre makroporer bidrager til spredningen. I ca. 8-9,5 m u.t., som geologisk forventes at udgøre toppen af en nedre morænelersaflejrings, er også set en tendens til (sub-)vertikal spredning og tættere spredning af sporstoffer end 25 cm injektionsafstand. I disse zoner vurderes der ikke at være noget væsentligt at hente ved tættere injektioner. I mellemliggende og dybere del af behandlingsintervallet formodes moræneleren at være fastere og have færre naturlige sprækker (eller andre makroporer). Injektioner med 25 cm og 10 cm afstand i intervallet 6-7 m u.t. gav i nogle tilfælde samme antal bånd af sporstof. Det er således vanskeligt at vurdere gevinsten ved injektioner med 10 cm afstand i forhold til 25 cm afstand i de fastere dele af moræneleren, men tættere injektion vurderes umiddelbart at give bedre sikkerhed for god fordeling i disse zoner.

Samlet vurderes direkte GeoProbe injektion velegnet til injektion af reaktive stoffer i forbindelse med oprensning på Vadsbyvej.

9.2 Hydraulisk frakturering

Hydraulisk frakturering er ved nærværende undersøgelse blevet afprøvet for at fremskaffe den nødvendige dokumentation om metoden kan benyttes med følgende to formål (jf. afsnit 6.2) på Vadsby lokaliteten: overkomme diffusionsbegrænsninger i kildeområdet (A) og/eller til en horisontal reaktiv barriere under det forurenede område (B).

I forhold til at benytte hydraulisk frakturering til formål A på Vadsbyvej er en multifrakstur søgt udført i intervallet 6,25-7,0 m u.t. Resultaterne viser, at en af sprækkerne er hældende til sub-vertikal, og to frakturer er gået sammen til en sprække. Sprækken injiceret i 6,5 meters dybde er ikke genfundet i nogen af de udtagne kerner. Det var således ikke muligt at skabe 4 tæt liggende sprækker. Det vurderes derfor ikke muligt at overkomme diffusionsbegrænsninger i kildeområdet under redoxgrænsen med metoden. For enkeltfrakturen udført over redoxgrænsen sås en vertikal spredning af sporstoffer fra den hydrauliske sprække via naturlige sprækker og andre makroporer over den hydrauliske sprække, så diffusionsbegrænsen i denne zone kunne overkommes. Udover de tekniske problemstillinger anses metoden heller ikke for en økonomisk rentabel løsning at anvende frakturering i zonen fra 6-15 m u.t. på lokaliteten i Vadsby.

I forhold til at benytte metoden til formål B på Vadsbyvej vil etablering af overlappende horisontale hydrauliske sprækker i betydelig dybde (10-13 m u.t.) være essentielt. Den dybeste hydrauliske sprække blev vertikal uden at der var anden geologisk forklaring herpå end dybden. Når resultatet af de geotekniske undersøgelser foreligger, kan der muligvis findes en mere håndfast forklaring på sprækkernes vertikale udbredelse. Også sprækker i 6 a 7 m's dybde var i nogle tilfælde formodentlig vertikale og i øvrige tilfælde ikke udbredt i et rimeligt konsistent område omkring fraktureringsboringerne. Det vurderes på dette grundlag for kompliceret og dermed alt for usikkert at forsøge at etablere en horisontal barriere i relevant dybde på Vadsbyvej.

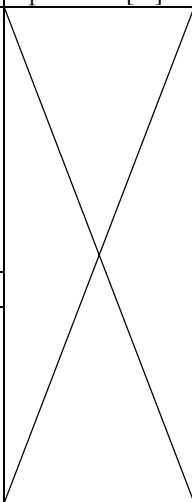
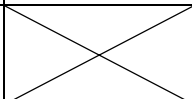
Hydraulisk frakturering findes på dette grundlag hverken egnet til oprensning i kildeområdet eller etablering af horisontal barriere på Vadsbyvej.

9.3 Sammenligning af injektionsmetoder

For at sammenligne de to metoder er resultaterne sammenstillet i tabel 2 sammen med omkostningerne forbundet med hver af metoderne.

Der er opnået en væsentligt bedre vertikal fordeling af sporstoffer, specielt under redoxgrænsen, ved direkte Geoprobeinjektioner end ved hydraulisk frakturering. Ved udførelse af en klynge på f.eks. 6 injektioner kan opnås samme horisontale udbredelse, som forventet ved en hydraulisk frakturering. Ved pneumatisk frakturering i et punkt kan sandsynligvis opnås omtrent tilsvarende vertikal fordeling som ved enkelt geoprobeinjektion indenfor ca. samme radius. Det kan konkluderes på baggrund af en kombineret afvejning af mulige tekniske løsninger og økonomi, at omkostningerne ved hydraulisk eller pneumatisk frakturering er højere – set i forhold til behandlet volumen i de kritiske dybder på mellem 6 og ca 10 meter under terræn – end ved direkte injektion med GeoProbe, vurderes direkte injektion at være mest omkostningseffektiv.

Tabel 2: Sammenligning af injektionsmetoder.

	Dybde [m u.t.]	Radius af hy- draulisk sprække [m]	Transportradius* [m]	Vertikal fordeling af spor- stof
GeoProbe injektion, klyn- ge+enkelt	2,5-3,5		1,25	Fordeling i flere dybder end der er injiceret primært i naturlige sprækker, bioporer og ormehuller. Indbyrdes afstand mellem sporstofbånd på ca. 10 cm i injektionsintervallerne opnået
	6-7		0,5**-1***	Overvejende fordelt i sprækker induceret under injektionen. Indbyrdes afstand mellem sporstofbånd på ca. 25 cm i injektionsintervallerne opnået i en afstand på 0,5 m.
	8,5-9,5		0,5**-1***	
Hydraulisk fracture- ring	Enkelt frakturer			
	3	3-3,5	5,5	Fordelt i naturlige sprækker, bioporer og ormehuller overvejende ved enden af sprækken.
	6,5	-	1,25	Enkelte steder spredt til et mindre antal overliggende naturlige sprækker.
	9,5	-	-	
	Multifraktur			
	6,25, 6,5, 6,75 og 7,0	-	1,6	Ikke opnået individuelle horisontale sprækker. Enkelte steder er sporstoffer spredt til et mindre antal overliggende naturlige sprækker (i sær for enden). Betydelig afstand mellem få sporstof bånd/sprækker.
Pneumatisk fracture- ring /14/	4, 5, 6, 7 og 8		1-2	Sporstofferne er overvejende truffet i naturlige sprækker.

* Max afstand til injektionspunkt hvor alle injektionsdybder er fundet

** Transportradius ved anden og tredje injektion

*** Transportradius ved første injektion

**** Ved fuldskala kan der være en rationaliseringsgevinst

10 Konklusion

Omkring og over redoxgrænsen er observeret en radial udbredelse for sporstofferne fra (transportradius) af alle injektionspunkter ved enkeltinjektionen på 1 m og i klyngefeltet på 1,25 m. Flere injektionsdybder har en større udbredelse på op til 2 m. Omkring og over redoxgrænsen spredtes sporstofferne overvejende via naturlige sprækker, bioporer og sandslirer.

Under redoxgrænsen er observeret en transportradius af alle injektionspunkter på 1 m. Sporstofferne der er injiceret i intervallet 6-7 m er overvejende spredt i smalle bånd, der tilsyneladende er induceret under injektionen. I det dybeste injektionsinterval findes der flere steder flere bånd end der er injiceret, hvilket muligvis kan relateres til at den øverste del af anden morænebænk sandsynligvis er opsprækket.

Injektionen i et klyngefelt viste at de to sidste injektioner blev sporet af den første injektion. Det forventes derfor, at en bedre spredning kan opnås ved at have større afstand mellem injektionspunkterne.

Ved testen af hydraulisk frakturering var det muligt over redoxgrænsen at lave en hydraulisk sprække med en radius på 3-3,5 m, beliggende forskudt i forhold til fraktureringsboringen. Sprækken er ca. 2 cm tyk, hvor den er tykkest, ned til enkelte alenestående sandkorn ved enden af frakturen. Sporstofferne er transporteret 0,5 m længere ud end frakturen. Sporstofferne er spredt i naturlige sprækker og bioporer overvejende for enden af sprækken.

Frakturen i 6,5 m forventes ud fra landhævningen at have en sydvestlig udbredelse. Tilstedeværelsen af fraktursand i kernerne udtaget i området stemmer dog ikke helt overens med denne forventning. Det er ikke muligt at redegøre for hverken radius eller form på frakturen.

Det var ikke muligt at lave en horisontal hydraulisk fraktur i 9,5 m u.t. Frakturen er i den øverste meter indtil terræn transporteret i naturlige sprækker.

Det var heller ikke muligt at lave 4 tætliggende frakturer fra en fraktureringsboring. Den øverste fraktur havde en vertikal udbredelse og de to dybeste løb sammen til en sprække. Den sidste fraktur blev ikke fundet.

Resultaterne viser at den mest anvendelige metode, til spredning af reaktive stoffer på kritiske dybder fra 6-10 meter i moræneler i forbindelse med oprensning af forurenningen på Vadsbyvej, er direkte injektion med GeoProbe. Hydraulisk frakturering findes ikke anvendelig til hverken behandling af kildeområdet eller som hydraulisk barriere på lokaliteten. Direkte injektion med GeoProbe er endvidere den mest omkostningseffektive metode.

11 Referencer

- /1/ Region Hovedstaden (2008), Skitseprojekt, Vadsbyvej 16A, Taastrup, Juni 2008, Orbicon
- /2/ Københavns Amt (2006), Pneumatisk Frakturering – Dokumentation af pilotforsøg Vadsbyvej 16A, Hedehusene. Februar 2006. NIRAS.
- /3/ Christiansen, C. M., Riis, C., Christensen, S. B., Broholm, M. M., Christensen, A. G., Klint, K.E. S., Wood, J. S. A., Bauer-Gottwein, P. and Bjerg, P. L. (2008), Characterization and Quantification of Pneumatic Fracturing Effects at a Clay Till Site. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 570–576.
- /4/ Miljøstyrelsen (2007), Oprensning af klorerede opløsningsmidler i moræner med stimuleret reduktiv deklorering. Lok. Nr. 461-169, Rugårdsvej 234-238, 5210 Odense NV. Pilotforsøg – Hovedrapport. November 2007. COWI, DTU Miljø, Geosyntec Consultants og Region Syddanmark.
- /5/ Miljøkontrollen (2006), Test af reduktiv deklorering som afværgeteknologi, Gammel Kongevej 39. Januar 2006. Hedeselskabet.
- /6/ Miljøministeriet (2006), Hydraulisk frakturering udført ved vandret boreteknik - Statusrapport for 1. driftsår, Walsted L. og Christensen, A. G., NIRAS for Miljøministeriet, Miljøprojekt Nr. 1113 2006
- /7/ Houmark-Nielsen, M. and Kjær, K. H. (2003), Southwest Scandinavia, 40–15 ka BP: palaeogeography and environmental change. *J. Quaternary Sci.*, Vol 18 pp. 769–786, ISSN 0267-8179.
- /8/ Houmark-Nielsen, M., Krüger, J. og Kjær, H. (2005), De seneste 150.000 år i Danmark, *Geviden, Geologi og geografi* nr. 2, 2005
- /9/ Region Hovedstaden (2009), Tillægsnotat til skitseprojekt, Vadsbyvej 16A, Taastrup. Udført af Orbicon for Region Hovedstaden, marts 2009
- /10/ Chambon, J., Damgaard, I., Lemming, G., Binning, P. J., Bjerg, P. L., Broholm, M. og Kern-Jespersen, H. (2009), Enhanced reductive dechlorination in clayey till: A modelling tool and application at Danish sites, ATV jord og grundvand, Vintermøde, 10.-11. marts 2009
- /11/ Miljøkontrollen (2006), Afværgeforanstaltninger, Dokumentationsrapport, Orbicon, december 2006
- /12/ Miljøkontrollen (2006), Afværgeforanstaltninger. Dokumentationsrapport. Vesterbrogade 116, Orbicon, 15. december 2006
- /13/ USEPA (1991), The feasibility of hydraulic fracturing of soil to improve remedial actions, Final report. EPA/600/2.91/012 (NTIS PB91-181818).
- /14/ Københavns Amt (2006), Pneumatisk frakturering, Pilotforsøg på Vadsbyvej 16A. Hedehusene, Supplerende undersøgelser, DTU og Niras, august 2006

/15/¹ Nilsson, B., Brøker, T. Slack, B., Kasela, T. and Klint, K. E. (2006), Installation of on-site stimulation set-ups within the Central Refueling Station at the Kluczewo Airfield, Poland, STRESOIL, In situ stimulation and remediation of contaminated fractured soils, Project no. SSPI-CT-2003-004017, 2006

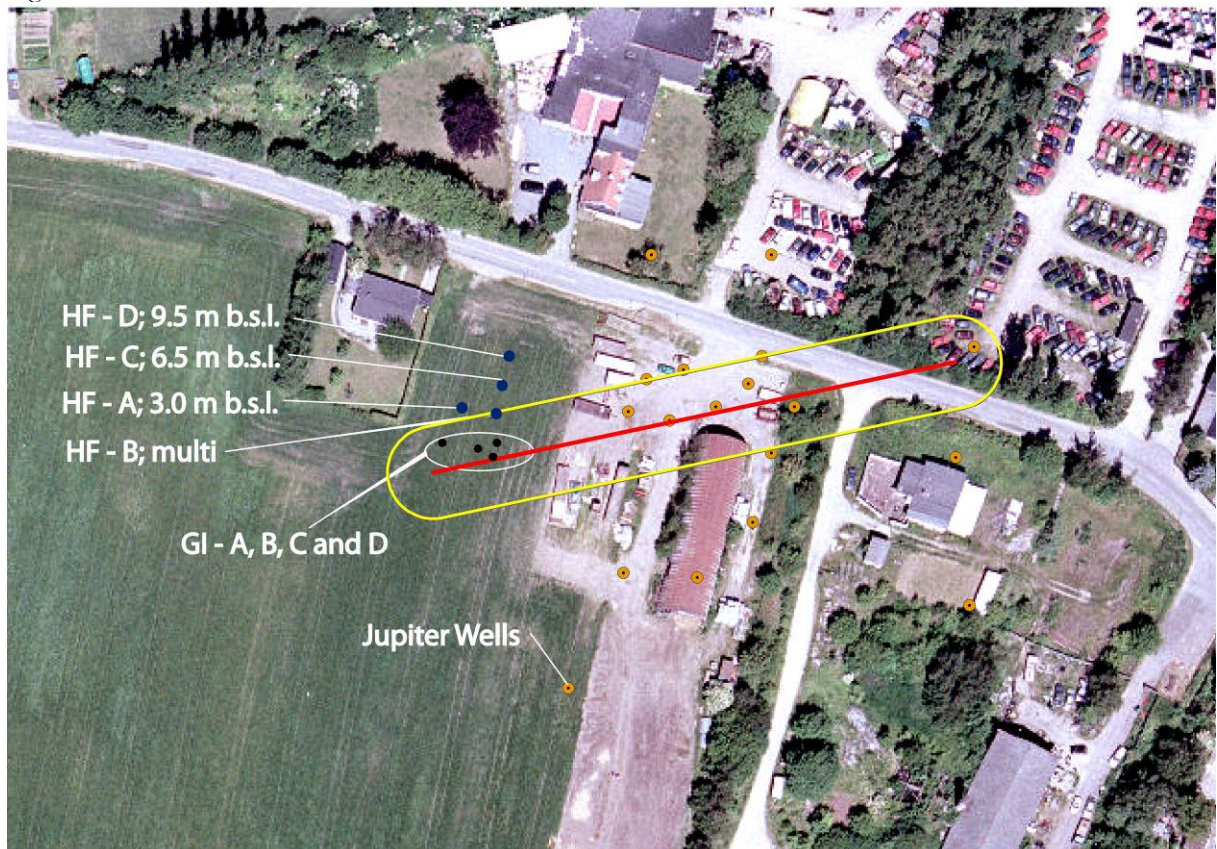
/16/ Riis,C., Christensen,A.G., Bjerg,P.L., Christensen,S.B., Broholm,M.M. & Scheutz,C. (2006): Pneumatisk frakturering. Dokumentation af pilotforsøg. Vadsbyvej 16A, Hedehusene. Københavns Amt. Niras, Allerød, maj 2006

¹ Refereres i bilag

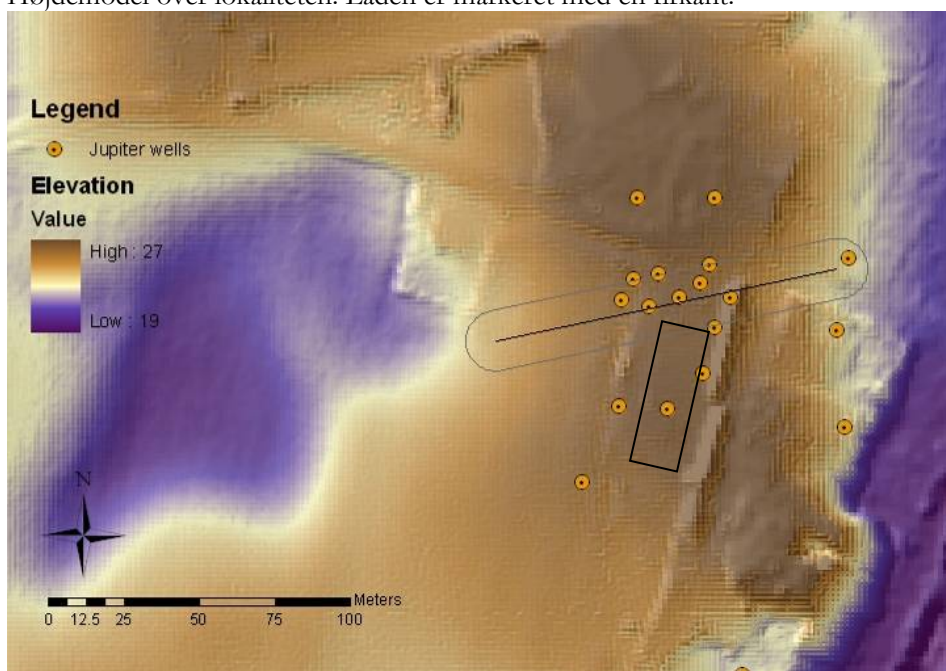
1	BILAG – GEOLOGI	2
2	BILAG – FORSØGSOPSÆTNING, DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	3
3	BILAG – KERNER, DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	5
4	BILAG – UDGRAVNING, GEOPROBE	6
5	BILAG – TRYK, DIREKTE INJEKTION MED GEOPROBE	8
6	BILAG – UDBREDELSE AF SPORSTOF, GEOPROBE	9
7	BILAG - OPTEGNINGER AF GEOLOGI, GEOPROBE	15
8	BILAG – KONCENTRATION AF SPORSTOFFER, GEOPROBE	18
9	BILAG – SPREDNING AF SPORSTOF, GEOPROBE, ENKELTINJEKTIONSFELT	22
10	BILAG – SPREDNING AF SPORSTOF, GEOPROBE, KLYNGEFELT	24
11	BILAG – FORSØGSOPSÆTNING, HYDRAULISK FRAKTURERING	26
12	BILAG – KERNER, HYDRAULISK FRAKTURERING	28
13	BILAG – UDGRAVNING, HYDRAULISK FRAKTURERING	31
14	BILAG – TRYK, HYDRAULISK FRAKTURERING	34
15	BILAG – LANDHÆVNING, HYDRAULISK FRAKTURERING	37
16	BILAG – UDBREDELSE AF SPORSTOF, HYDRAULISK FRAKTURERING	39
17	BILAG - OPTEGNINGER AF GEOLOGI, HYDRAULISK FRAKTURERING	40
18	BILAG – KONCENTRATION AF SPORSTOFFER, HYDRAULISK FRAKTURERING	41
19	BILAG – HYDRAULISKE FRAKTURER	43
20	BILAG – OPTEGNINGER AF SPORSTOFFER UD FRA KERNEPRØVER	46
21	BILAG – MONITERINGSBORING	53

1 Bilag – Geologi

I nedenstående figur ses en oversigt af lokaliteten. I figuren er placeringen af undersøgelserne og det geologiske tværsnit vist.



Højdemodel over lokaliteten. Laden er markeret med en firkant.



2 Bilag – Forsøgsopsætning, direkte injektion med GeoProbe

I nedenstående figur ses den vertikale forureningsfordeling på Vadsbyvej sammen med injektionsdybderne i single og klyngeboringerne. Følgende aktiviteter er udført på lokaliteten i forbindelse med GeoProbe injektionerne:

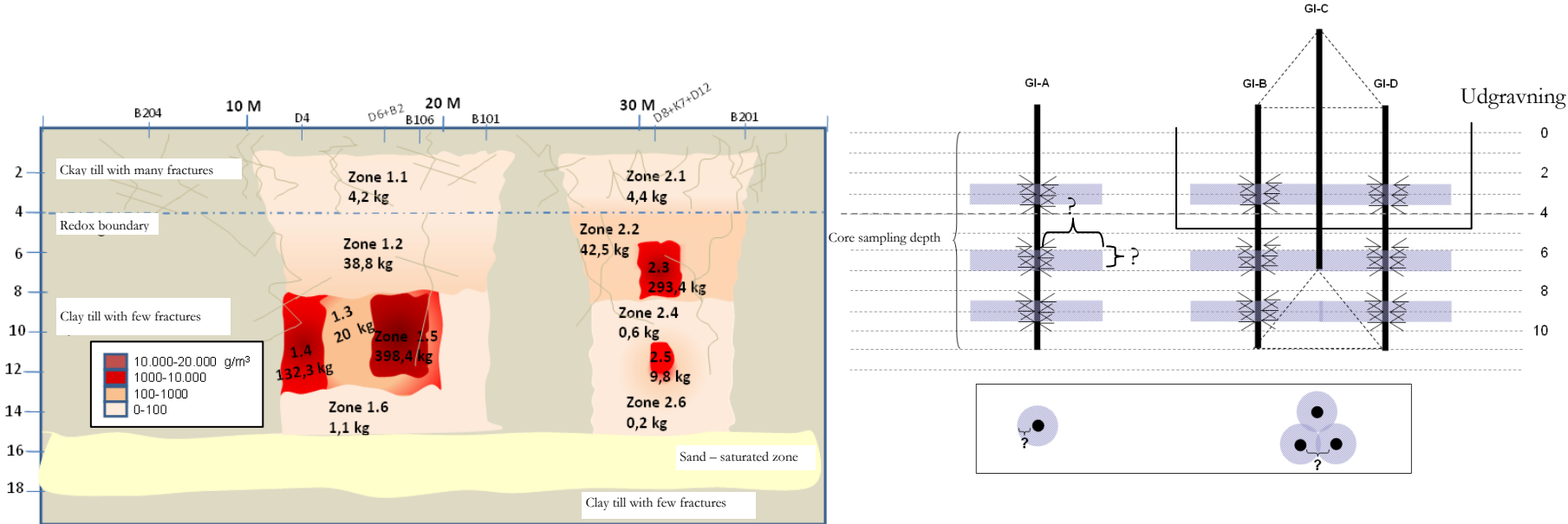
1. GeoProbeinjektion af sporstofblanding i én boring (GI-A) i forskellige dybder (2,5-3,5, 6-7 og 8,5-9,5 m u.t.) med 25 cm mellem hver injektion. (20. oktober 2008)
2. GeoProbeinjektion af sporstof i 3 boringer (GI-B, C and D) med en afstand på 1,5 m (GI-A) i 3 dybdeinterval (2,5-3,5, 6-7 og 8,5-9,5 m u.t.). Afstanden er baseret på den observerede udbredelse ved enkeltinjektionen. Det øverste interval i GI-B blev fravalgt til fordel for at øge antallet af injektionspunkter i det mellemste interval, således at der her blev injiceret i 10 punkter med 10 cm interval. I GI-C og -D blev der injiceret hver 25 cm i hvert dybdeinterval (27. og 28. oktober 2008).

De direkte injektioner med GeoProbe blev udført af Ejlskov Consult A/S. Der blev injiceret 10 l sporstof i hver injektionsdybde med et tryk varierende mellem 20-25 bar (tryktabet i ledninger osv. var ca. 20 bar). Injektionerne blev lavet som top-down. Efter injektionen blev hvert injektionspunkt forseglet med bentonit for at undgå styring af efterfølgende injektioner.

Koordinaterne og terrænkoterne på injektionspunkterne kan ses i nedenstående tabel.

Injektionspunkt	UTM X	UTM Y	Terræn kote [m over DNN]
GI-A	323910,74	6173688,81	22,52
GI-B	323916,2	6173685,2	22,79
GI-C	323917,0	6173684,0	22,87
GI-D	323917,6	6173685,4	22,86

Den vertikale forureningsfordeling på Vadsbyvej (Orbicon, 2008) (v), samt injektionsdybderne for single og klynge GeoProbeinjektionerne (h).



3 Bilag – Kerner, direkte injektion med GeoProbe

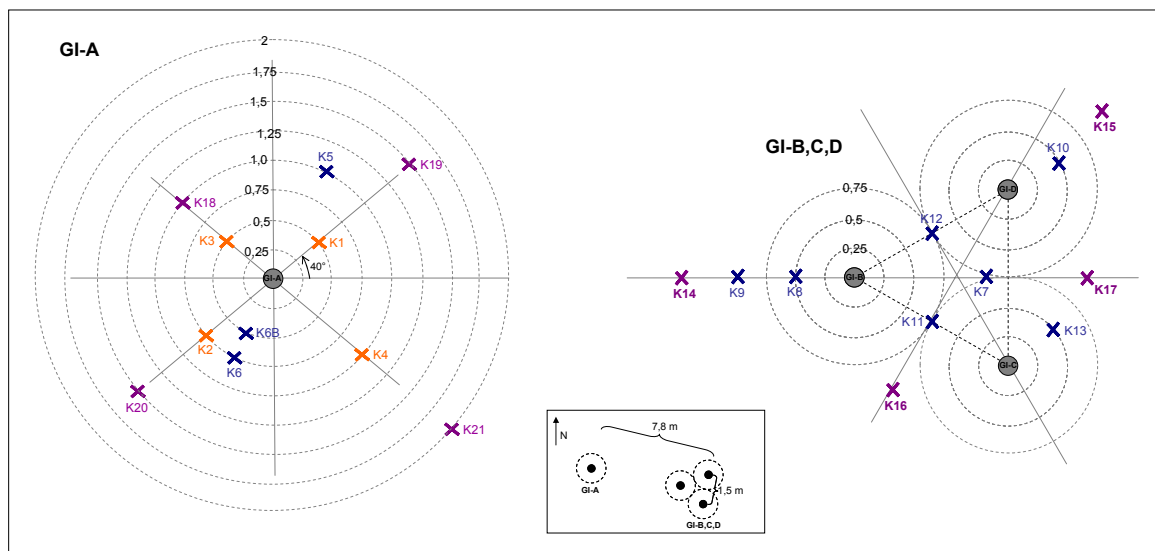
Til dokumentation af sporstoffspreddingen er følgende feltundersøgelser udført:

1. Udtagning af 10 kerner ved enkelt injektionsfeltet,
2. Udtagning af 11 kerner ved klyngeinjektionsfeltet,
3. Udgravning af klyngefeltet indtil 4,5 m u,t,

Fra den 21. til den 22. oktober blev der udtaget 4 kerner rundt om injektionspunktet. Kernerne blev udtaget af Ejlskov med GeoProbe fra 0 til 11 m u.t. i 6 cm, 1,2 m lange klare PVC-liners.

Fra den 28. til den 30. november 2008 blev der udtaget 9 kerner fra 0 til ca. 11 m u.t., 2 ved GI-A og 7 ved klyngefeltet. Fra den 6.-8. og 13.-15. januar 2009 blev kernerne K14-K21 udtaget.

Placeringen af kernerne ved enkelt injektions punktet, GI-A, og klyngefeltet, GI-B, -C og -D. Terrænvariationen hvor kernerne er udtaget er meget lille. Terrænkoten hvor kernerne er udtaget er derfor antaget at være den samme kote som terrænkoten ved injektionspunkterne.



Under kerneudtagningen var det nødvendigt at flytte på flere kerneudtagningspunkter på grund af større sten. Kernerne er efter udtagning opbevaret mørkt ved 10°C. Opbevaringstiden inden analyse er holdt så kort som muligt. Kernerne er analyseret én af gangen.

Delprøvetagningsstrategi af kerner

Der er udtaget jordprøver fra alle fluorescerende områder i kernerne fra GI-A med henblik på at lave en detaljeret massebalance for sporstoffordelingen. Endvidere er der udtaget prøver til diffusionsprofiler fra hvert af injektionsintervallerne (2,5-3,5; 6-7; 8,5-9,5 m u.t.) for at undersøge sporstoftransporten i og omkring sprækkerne. I klyngefeltet er der udtaget stikprøver, der skal benyttes til at vurdere koncentrationsniveau på billederne taget under UV-lys. Tilsvarende prøvetagningsstrategi er benyttet for kernerne fra de hydrauliske frakturer.

Analyse af jordprøver

Jordprøverne er udtaget i vials indeholdende 20 ml borax (0,02 M) til at ekstrahere de fluorescerende stoffer fra jorden til vandfasen. Jordprøverne er opbevaret i roterkasse ved 10°C i minimum ét døgn inden analyse. Koncentrationerne af fluorescein og Rhodamine WT er målt på et GGUN-FL02 fluorometer /13/.

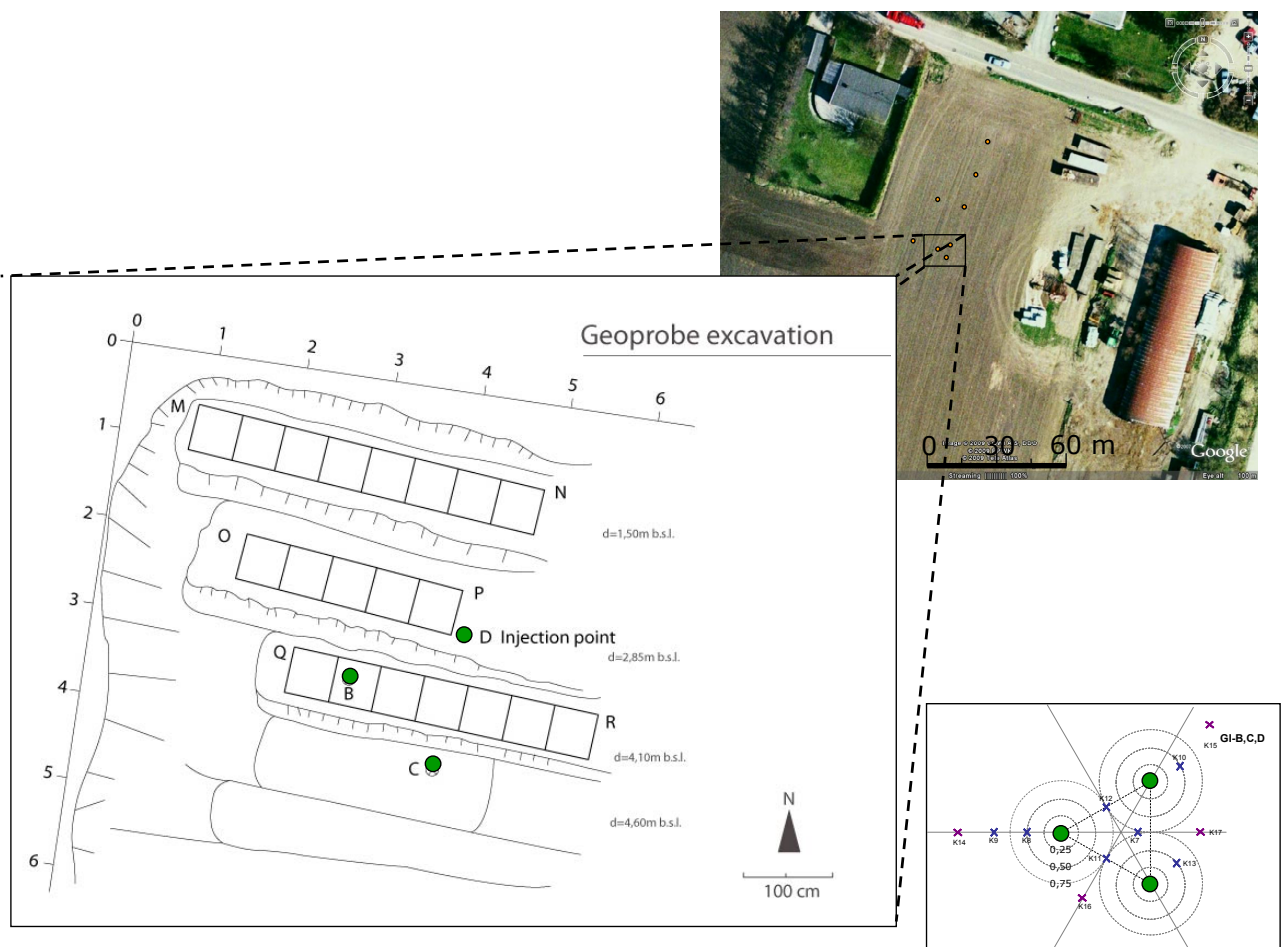
Billedanalyse

Til at fremhæve sporstofferne på billederne er billedprogrammet Adobe Photoshop CS2 benyttet.

4 Bilag – Udgravning, GeoProbe

Udgravningen ved klyngefeltet er lavet tværs gennem klyngefeltet, så det sydligste injektionspunkt (GI-C)) kom i bunden af graven og hvert af injektionspunkterne mod nord (GI-B og GI-D) kom på hver sin hylde. Udgravningen er lavet til 4,5 m u.t. (en meter inder sidste injektionsdybde) for at være sikker på at alle injektionsdybderne i injektionsintervallet kunne genfindes.

Udgravningen er lavet fra den 12. til den 15. januar 2009. Udgravningen blev udført af Riisengården. Skitse af udgravningen af GeoProbe klyngeinjektionsfeltet kan ses i nedenstående figur.



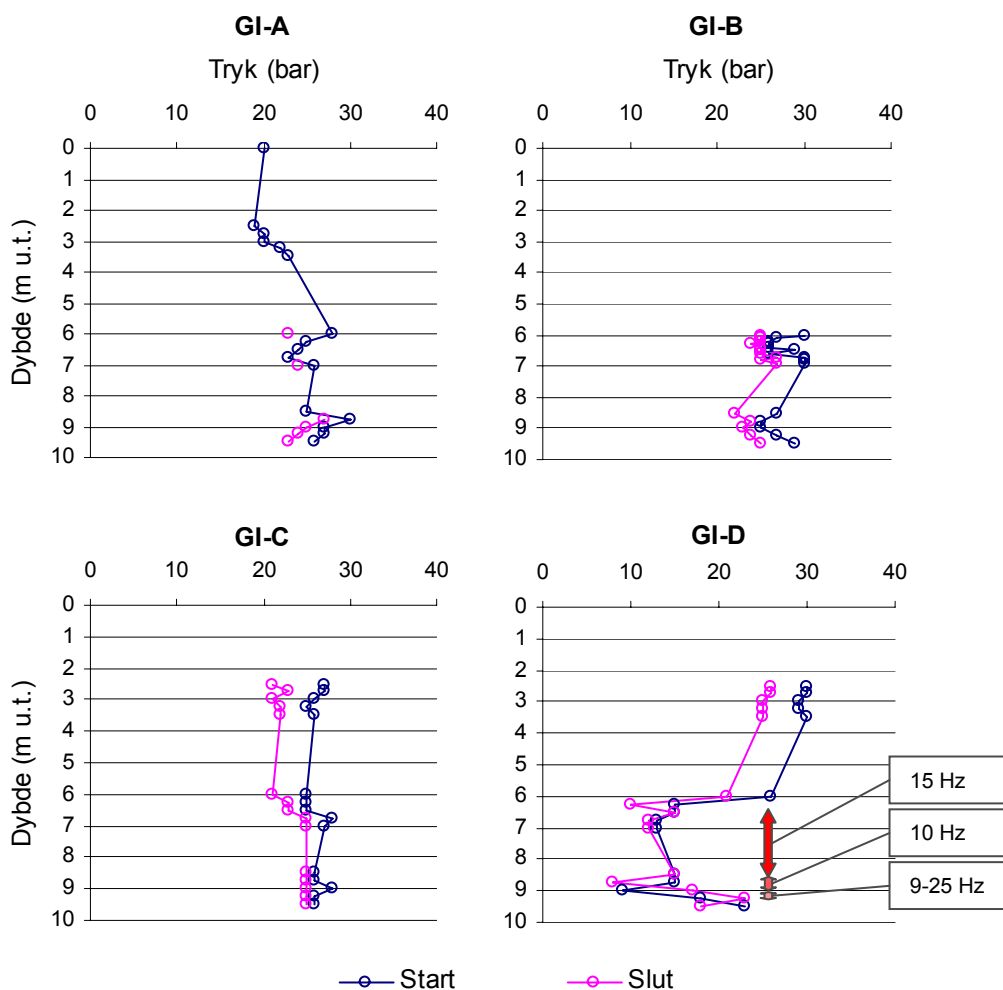
Udgravning af GeoProbe klyngeinjektionfeltet



5 Bilag – Tryk, direkte injektion med GeoProbe

De noterede tryk under de direkte injektioner med GeoProbe kan ses i nedenstående figur. Der hvor der ikke er noteret et slut tryk er trykket ikke faldet ved slutningen af injektionen. Alle injektioner er lavet ved 25 Hz. Ved injektionerne fra 7 til 9,25 m u.t. i GI-D var det nødvendigt at sænke flowet, da der var opskydning til overfladen. Derved blev trykket også lavere.

Det kan ses, at starttrykket ved de fleste injektioner er højere end trykket ved slutningen af injektionen. Dette skyldes sandsynligvis at injektionsvæsken nemmere kan spredes efter leren er gennembrudt, hvorved trykket falder.



6 Bilag – Udbredelse af sporstof, GeoProbe

I nedenstående tabel ses dybderne, hvor der er fundet sporstof og sporstoffernes udbredelse. Det er endvidere markeret om sporstofferne er fundet som et diffusivt område (D) eller om det er fundet i forbindelse med høj permeabelt sediment (V). Små ikke gennemgående pletter er markeret med P.

Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vådt, P=plet)
GI-K1	1,51	1,99	0,48	Plettet, i ormehuller og sprækker
	5,52	5,52	0,00	P
	5,06	5,06	0,00	P
	5,80	5,82	0,03	D
	9,40	9,43	0,03	D
	10,08	10,08	0,00	P
	10,24	10,31	0,07	D
	10,35	10,45	0,10	D
	10,52	10,58	0,06	D
GI-K2	1,46	1,61	0,15	D
	2,42	2,42	0,00	P
	2,43	2,43	0,00	P
	2,46	2,49	0,03	D
	2,82	2,83	0,01	D
	2,92	2,96	0,04	D
	3,13	3,16	0,03	D
	3,17	3,20	0,03	D
	3,29	3,35	0,06	D
	3,54	3,57	0,03	D
	5,70	5,78	0,08	D
	6,37	6,52	0,15	D
	6,53	6,59	0,07	D
GI-K3	0,99	0,99	0,00	P
	1,11	1,11	0,00	P
	1,20	1,20	0,00	P
	1,24	1,24	0,00	P
	1,32	1,44	0,12	D
	1,48	1,59	0,11	D
	1,61	1,85	0,24	D
	1,89	1,89	0,00	D
	1,98	1,98	0,00	D
	2,02	2,02	0,00	D
	2,04	2,07	0,04	D
	2,10	2,15	0,05	D
	2,20	2,20	0,00	D
	2,26	2,31	0,05	D
	2,38	2,38	0,00	D
	2,40	2,42	0,02	D
	2,48	2,51	0,03	D
	2,60	2,63	0,03	D
	2,78	2,78	0,00	P
	2,81	2,84	0,03	D
	2,97	2,97	0,00	P
	3,03	3,13	0,10	D

Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vådt, P=plet)
GI-K3	3,22	3,26	0,03	D
	3,46	3,53	0,06	D
	3,57	3,58	0,01	D
	5,74	5,81	0,06	D
	6,01	6,05	0,04	D
	6,22	6,28	0,06	D
	6,42	6,47	0,05	D
	6,64	6,68	0,03	D
	7,96	7,96	0,00	P
GI-K4	1,38	1,38	0,00	P
	1,58	1,58	0,00	P
	1,61	1,85	0,24	P
	2,01	2,02	0,01	D
	2,07	2,12	0,04	D
	2,16	2,33	0,17	Flere P
	2,42	2,42	0,00	P
	2,51	2,51	0,00	P
	2,54	2,54	0,00	P
	2,70	2,75	0,05	P
	2,96	2,96	0,00	P
	3,03	3,06	0,03	D
	3,14	3,15	0,01	D
	5,47	5,54	0,07	D
	5,56	5,60	0,04	D
	6,00	6,04	0,03	D
	6,68	6,75	0,07	D
	8,90	9,08	0,19	V
GI-K5	1,20	1,78	0,58	D
	2,44	2,49	0,04	D
	2,51	2,53	0,02	D
	2,68	2,74	0,07	D
	2,93	2,94	0,01	P
	3,08	3,16	0,08	D
	3,98	4,05	0,07	D
	5,65	5,74	0,09	D
	5,86	5,90	0,04	D
	5,90	5,92	0,02	D
	6,39	6,49	0,10	D
	7,01	7,15	0,14	D
	7,26	7,32	0,05	D
	7,48	7,62	0,14	D
	7,69	8,10	0,41	D
	8,46	8,51	0,05	D
	10,22	10,30	0,08	D
GI-K6	0,00	0,05	0,05	D
	1,22	1,65	0,43	V
	1,68	1,89	0,21	D
	1,96	1,96	0,00	P
	2,04	2,08	0,04	D
	2,09	2,15	0,05	D
	2,16	2,24	0,08	D

Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vådt, P=plet)
GI-K6	2,47	2,47	0,00	P
	2,58	2,64	0,07	D
	2,80	3,30	0,50	D
	3,38	3,60	0,22	D
	5,54	5,80	0,26	D
GI-K7	2,41	2,41	0,00	P
	2,43	2,50	0,07	D
	2,55	2,58	0,03	D
	2,61	2,66	0,04	D
	2,69	2,77	0,08	D
	2,79	2,84	0,05	D
	2,88	2,89	0,01	D
	2,98	3,01	0,03	D
	3,04	3,09	0,05	D
	3,13	3,14	0,01	D
	3,78	3,82	0,04	D
	4,62	4,66	0,04	D
	4,80	4,84	0,04	D
	5,09	5,17	0,07	D
	6,52	6,59	0,07	D
	6,84	6,90	0,06	D
	7,20	7,22	0,02	D
	7,71	7,83	0,11	P, flere
	9,04	9,09	0,05	D
	9,14	9,34	0,19	D
	9,46	9,51	0,05	D
	9,54	9,58	0,04	D
	9,70	9,73	0,03	D
	9,93	9,99	0,06	D
GI-K8	4,64	4,70	0,06	D
	4,71	5,20	0,49	D
	6,07	6,09	0,02	D
	6,35	6,52	0,17	D
	6,54	6,57	0,03	D
	7,27	7,33	0,06	D
	8,04	8,04	0,00	P
	8,24	8,27	0,03	D
	8,29	8,34	0,05	D
	8,34	8,36	0,02	P
	9,68	9,78	0,10	D
	10,46	10,58	0,12	D
GI-K9	0,00	0,13	0,13	D
	3,50	3,50	0,00	P
	2,75	2,83	0,09	D
	5,59	5,70	0,11	D
	7,12	5,97	-1,15	D
	6,20	6,20	0,00	P
	6,55	6,62	0,07	D
	6,67	6,71	0,04	D
	6,80	6,85	0,05	D
	7,65	7,71	0,06	D

Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vådt, P=plet)
GI-K9	7,95	8,06	0,11	D
	8,07	8,16	0,09	D
	8,40	8,51	0,11	D
	8,64	8,73	0,09	D
	8,75	8,79	0,04	D
	8,80	8,89	0,09	D
	8,91	8,91	0,00	P
	8,95	9,04	0,08	V
	9,05	9,37	0,32	D
	9,49	9,60	0,11	D
GI-K10	1,73	2,04	0,31	D
	2,06	2,21	0,14	D
	2,40	2,71	0,31	D
	2,85	3,06	0,21	D
	3,13	3,21	0,08	D
	3,39	3,49	0,10	D
	5,35	5,42	0,07	D
	5,47	5,61	0,14	D
	5,71	5,82	0,11	D
	5,87	5,98	0,11	D
	6,97	7,15	0,19	D
	7,20	7,25	0,05	D
	8,95	8,98	0,03	D
	9,92	10,17	0,25	D
	10,70	10,79	0,09	D
GI-K11	1,15	1,20	0,05	D
	2,04	2,08	0,04	D
	2,49	2,59	0,10	D
	2,60	2,73	0,13	D
	2,81	2,96	0,15	D
	3,01	3,27	0,26	D
	3,49	3,53	0,04	D
	4,54	4,65	0,11	D
	4,71	4,80	0,09	D
	4,84	4,97	0,13	D
	6,05	6,05	0,00	P
	6,17	6,25	0,08	D
	6,34	6,48	0,14	D
	6,68	6,76	0,08	D
	6,86	6,93	0,07	D
	7,10	7,15	0,05	D
	8,56	8,76	0,19	D
	9,23	9,46	0,22	D
	9,52	9,60	0,08	D
	9,61	9,61	0,00	P
	9,95	10,06	0,11	D
	10,25	10,41	0,16	D
GI-K12	2,55	2,76	0,21	D
	2,84	2,99	0,15	D
	3,03	3,13	0,10	D
	3,15	3,28	0,13	D

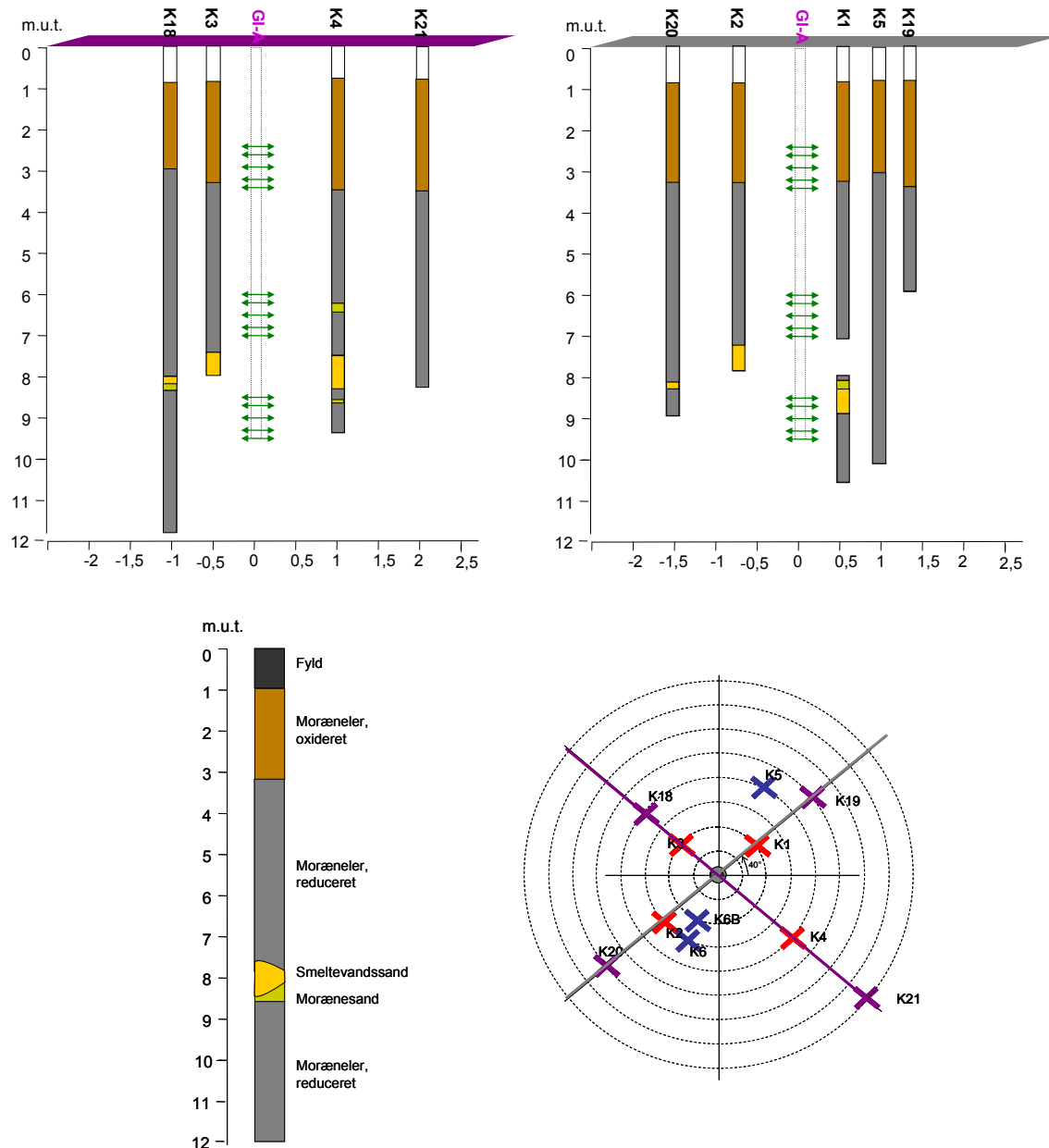
Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vådt, P=plet)
GI-K12	3,40	3,45	0,05	D
	4,66	4,77	0,11	D
	4,99	5,12	0,12	D
	6,07	6,18	0,11	D
	6,26	6,43	0,16	D
	6,66	6,72	0,06	D
	6,76	6,84	0,08	D
	7,13	7,20	0,07	D
	7,57	7,67	0,10	D
	8,67	8,81	0,13	D
	9,14	9,38	0,23	D
	9,51	9,60	0,09	D
	9,64	9,70	0,06	D
GI-K13	1,89	2,00	0,11	D
	2,04	2,40	0,36	D
	2,73	2,88	0,14	D
	3,27	3,36	0,09	D
	4,95	5,11	0,15	D
	6,31	6,44	0,12	D
	6,51	6,64	0,13	D
	9,83	9,98	0,15	D
GI-K14	3,39	3,45	0,06	D
	5,90	5,95	0,05	D
	6,01	6,15	0,14	D
	6,32	6,47	0,15	D
	8,41	8,91	0,50	D
	9,03	9,35	0,32	D
	10,33	10,40	0,07	D
GI-K15	1,69	2,40	0,71	D
	2,40	3,11	0,71	D
	4,16	4,29	0,13	D
	5,86	5,89	0,03	D
	6,02	6,06	0,04	D
	7,62	7,75	0,13	D
	10,70	10,95	0,24	D
	11,90	11,97	0,08	D
GI-K16	2,85	3,01	0,15	D
	3,10	3,28	0,17	D
	4,10	4,27	0,17	D
	4,68	4,89	0,21	D
	5,20	5,30	0,10	D
	5,58	5,72	0,14	D
	6,49	6,66	0,17	D
	6,74	6,80	0,06	D
	6,93	7,09	0,16	D
	7,30	7,42	0,12	D
	8,20	8,33	0,13	D
	8,37	8,51	0,13	D
	10,38	10,40	0,02	D
GI-K17	1,73	1,89	0,17	V
	1,86	1,96	0,10	D

Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vådt, P=plet)
GI-K17	2,11	2,30	0,19	D
	2,30	2,72	0,42	D
	2,85	3,19	0,34	D
	3,29	3,39	0,09	D
	4,73	4,80	0,07	D
	4,80	5,04	0,24	D
	5,42	5,62	0,20	D
	6,92	7,09	0,17	D
GI-K18	2,55	2,84	0,29	D
	3,00	3,07	0,07	D
	3,11	3,26	0,16	D
	3,30	3,35	0,06	D
	3,43	3,45	0,02	D
	5,96	6,10	0,14	D
	6,10	6,15	0,05	D
	6,39	6,50	0,11	D
	6,54	6,64	0,09	D
	8,50	8,75	0,25	V
GI-K19	1,88	2,30	0,42	D
	3,21	3,30	0,08	D
	5,93	6,07	0,13	D
GI-K20	1,53	1,98	0,45	V
	2,59	2,79	0,19	D
	3,00	3,21	0,21	D
	3,30	3,35	0,06	D
	3,46	3,49	0,03	D
	3,50	3,69	0,19	D
	5,92	6,03	0,11	D
	6,25	6,36	0,11	D
	6,46	6,58	0,12	D
GI-K21	6,86	7,04	0,18	D
	7,30	7,40	0,10	D
	7,73	7,91	0,17	D

7 Bilag - Optegninger af geologi, GeoProbe

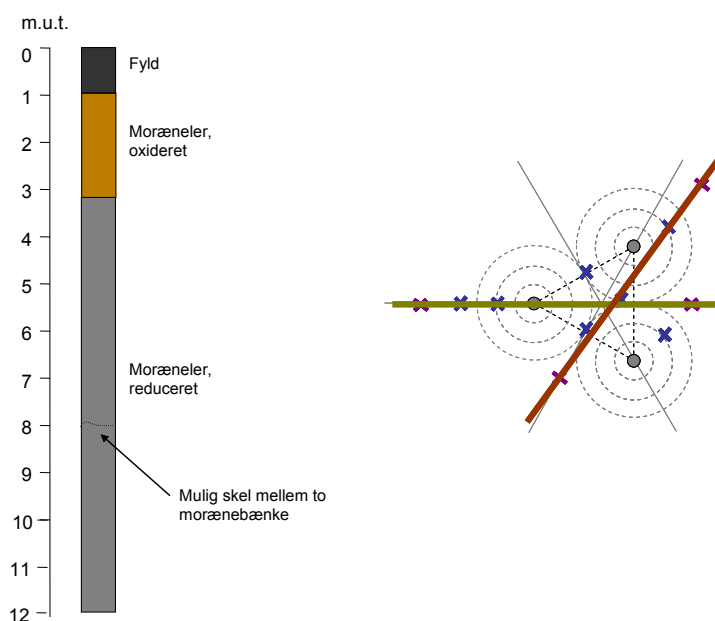
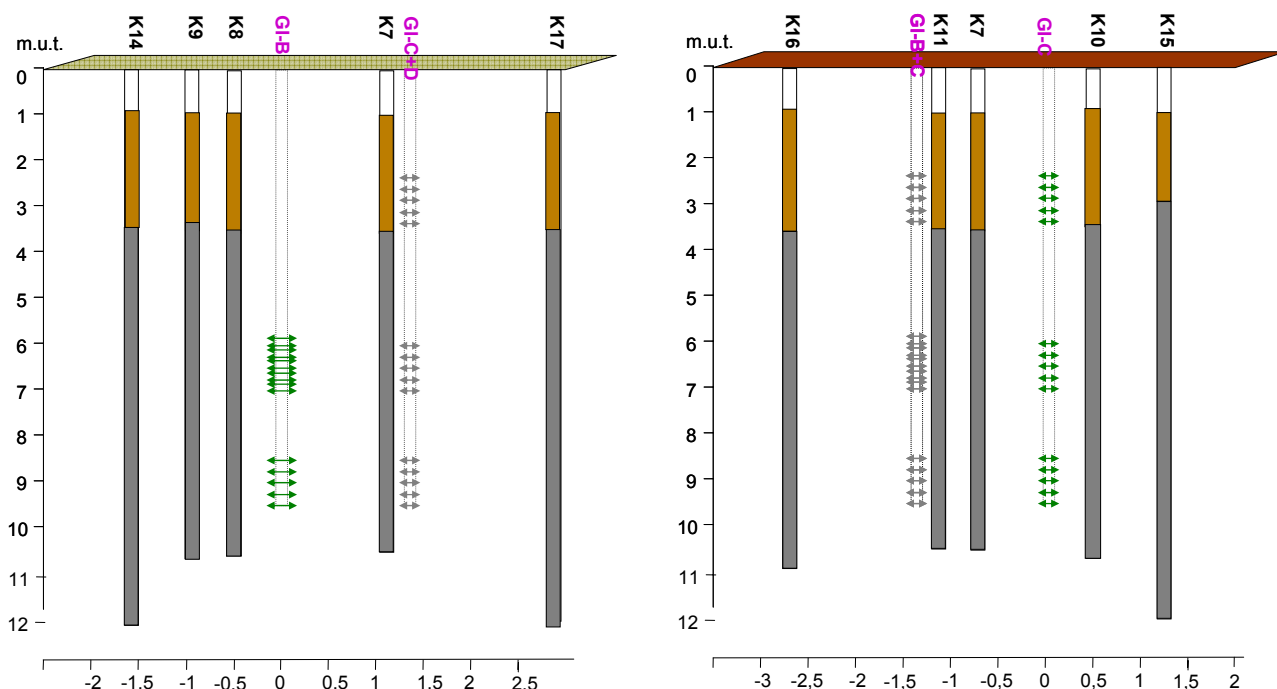
Der findes ca. 80 cm fyld underlagt af moræner. Moræneleren har en mægtighed på ca. 7 m. Undr moræneleret findes et smeltevandssandlag. Dette smeltevandssandlag er fundet i de fleste kerneboringer. I nogle af kernerne er der fundet indslag af morænesand over eller under smeltevandssandlaget. Dette kan være aflejret under isens bevægelse ind over terrænet. Under dette lag findes endnu en morænebænk. Smeltevandssandlaget kan indikere at den øvre og nedre moræne er aflejret under to forskellige istider eller isfremstød.

Herunder ses den geologiske sammensætning i kernerne fra enkeltinjektionsfeltet (øverst). Under disse ses en konceptuel kerne tolket ud fra kernerne. Endvidere ses kernerne placering omkring injektionspunktet.



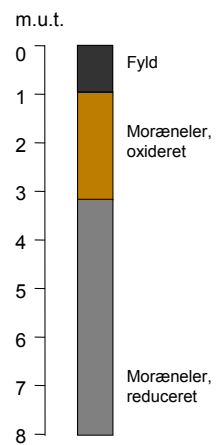
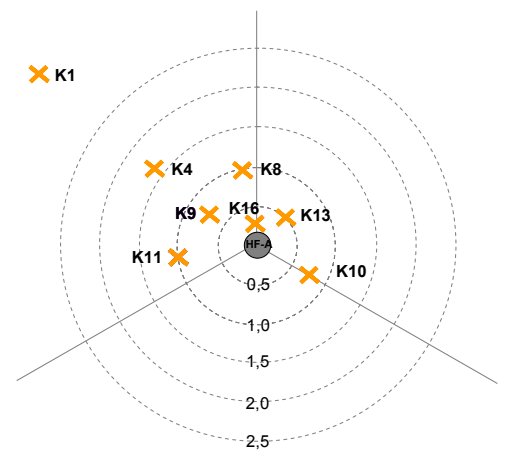
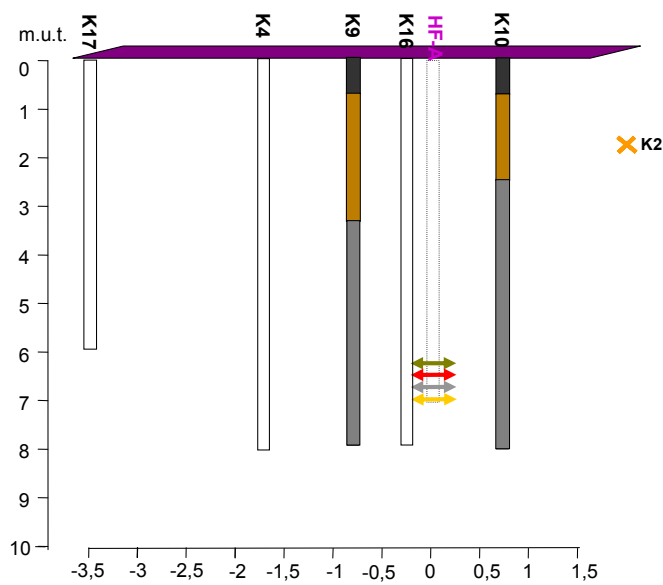
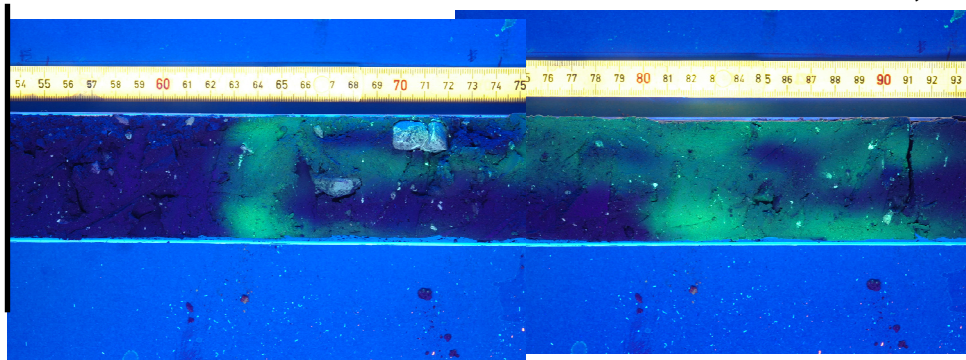
Der findes generelt ca. 80 cm fyld underlagt af moræner. Redoxgrænsen findes i ca. 3,6 m u.t. Spredningen af sporstoffer i ca. 9 m.u.t. indikerer, at der, tilsvarende i enkeltinjektionspunktet, findes to morænebænke inden det sekundære grundvandsmagasin findes i ca. 15 m u.t. Ex. på sporstoffordelingen i GI-K7 fra 8,92-9,32 m u.t. ses herunder. Det ses, at sporstofferne er spredt både horisontalt og vertikalt, sandsynligvis på grund af tilstedeværelsen af naturligt sprækker. Disse sprækker kan være dannet i mellemistiden, hvor den underste moræne dannede terrænet. Sprækker kan endvidere være dannet under isen i den sidste istid.

Herunder ses den geologiske sammensætning i kernerne fra klyngeinjektionsfeltet (øverst). Derunder ses en konceptuel kerne tolket på baggrund af kerne- og billedobservationer.



8,92 m u.t.

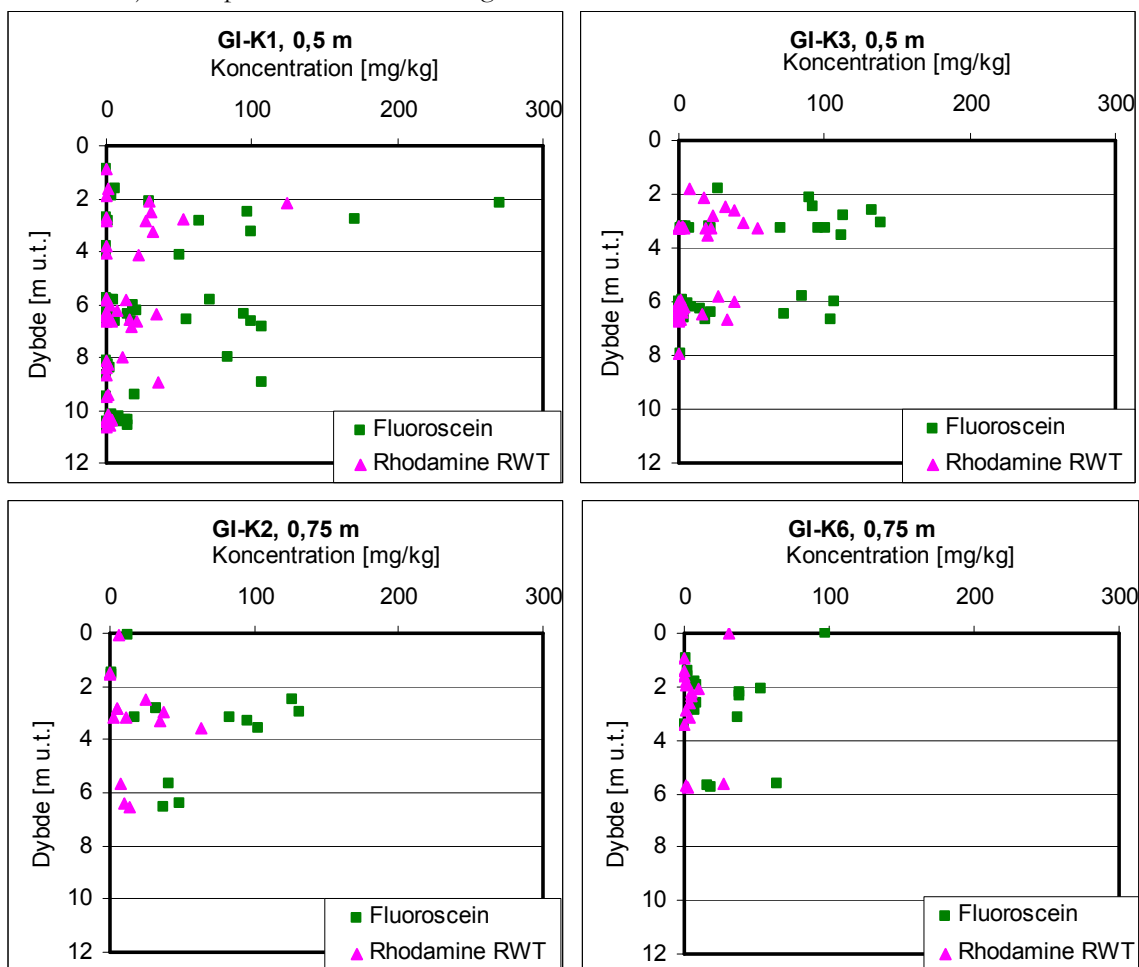
9,32 m u.t.

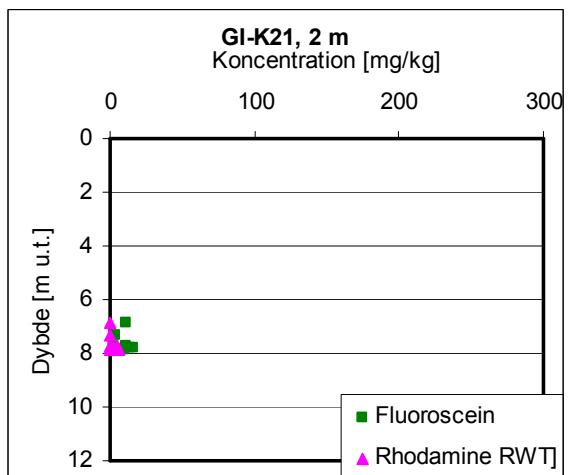
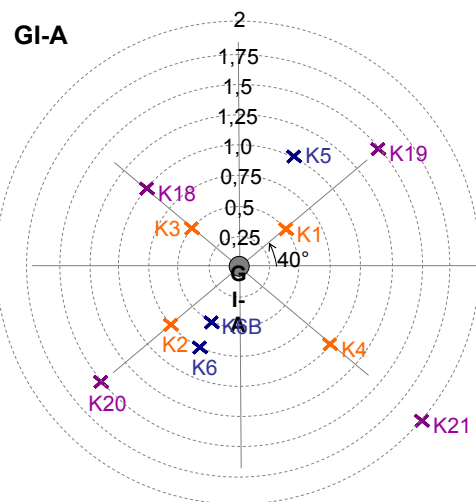
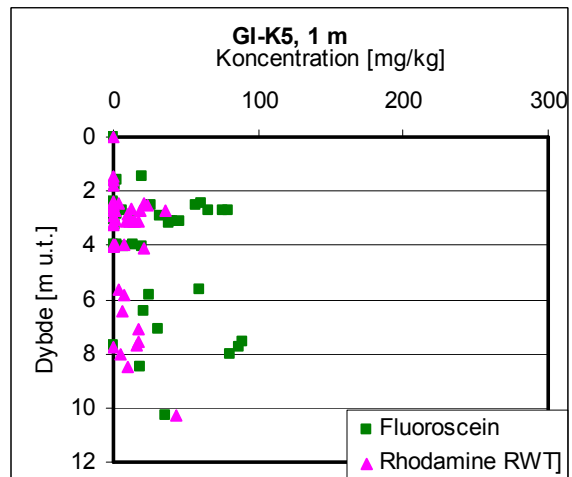


Fraktureringsdybde
Kerneboring

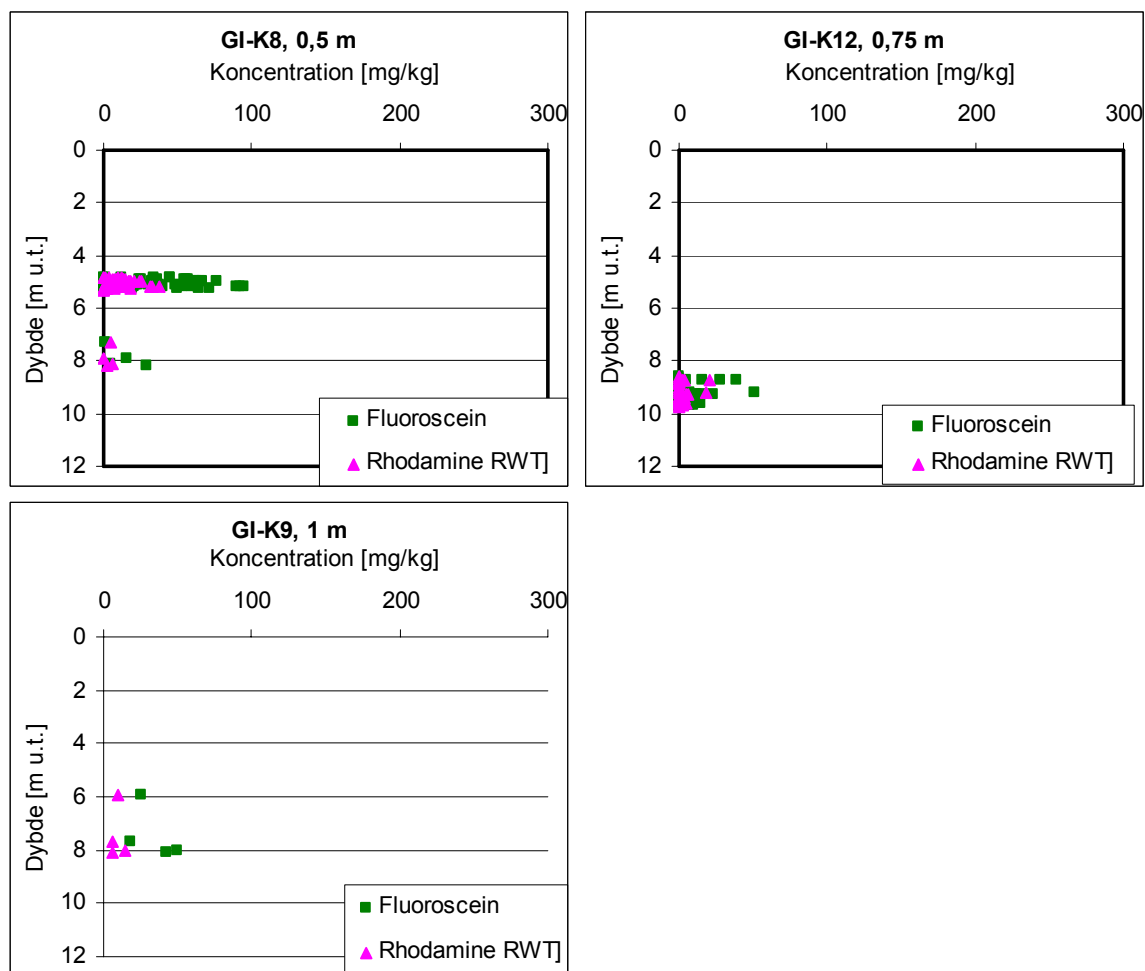
8 Bilag – Koncentration af sporstoffer, GeoProbe

Herunder ses de målte koncentrationer af rhodamine WT (rød) og fluorescein (grøn) i kernerne fra enkelt injektionspunktet. Afstanden til injektionspunktet er angivet efter kernens navn. Placeringen af kernerne rundt om injektionspunktet kan ses under graferne.

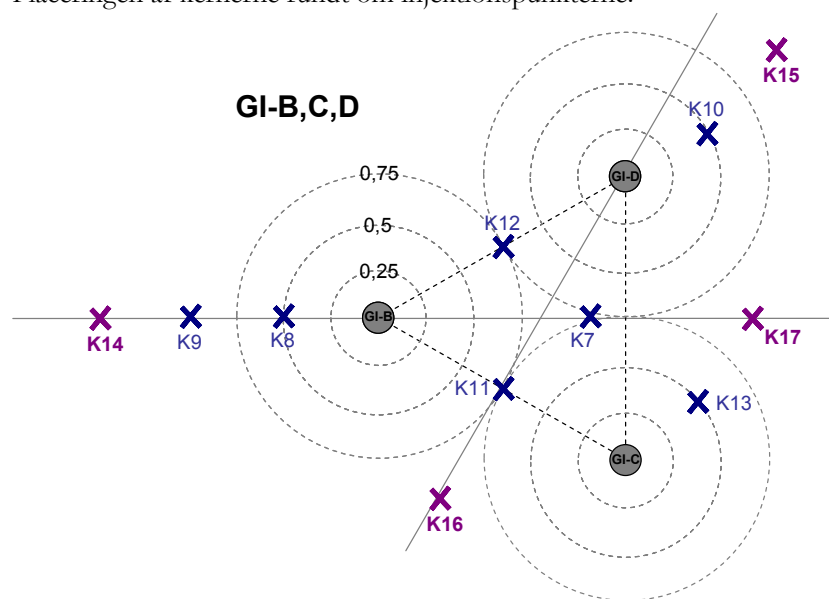




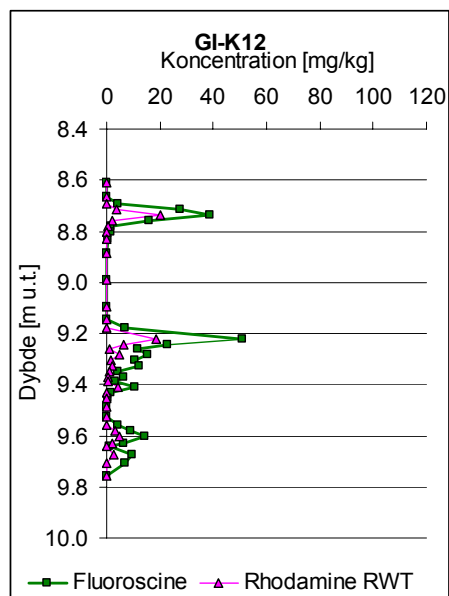
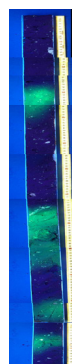
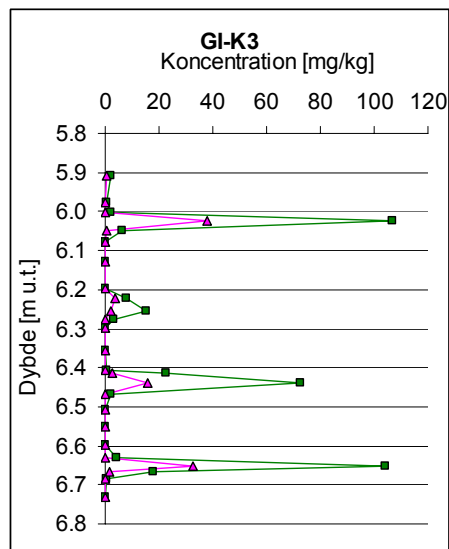
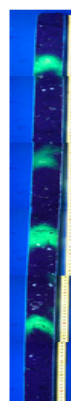
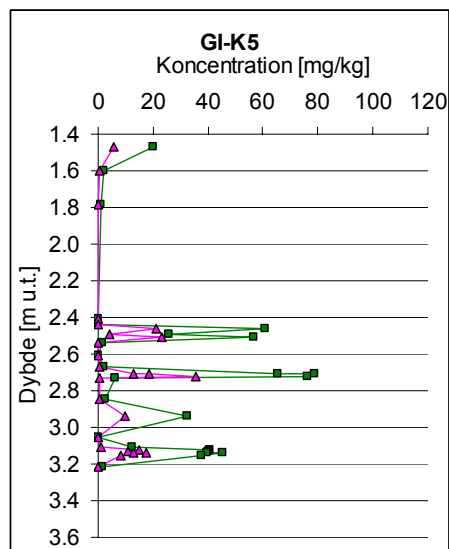
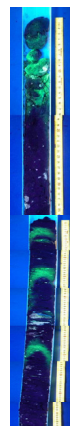
Herunder ses målte koncentrationer af rhodamine WT (rød) og fluorescein (grøn) i kernerne fra klynge injektionsfeltet. Afstanden til injektionspunktet er angivet efter kernens navn. Der er ikke udtaget prøver til at måle koncentrationen af rhodamine WT og fluorescein i alle kernerne prøverne.



Placeringen af kernerne rundt om injektionspunkterne.

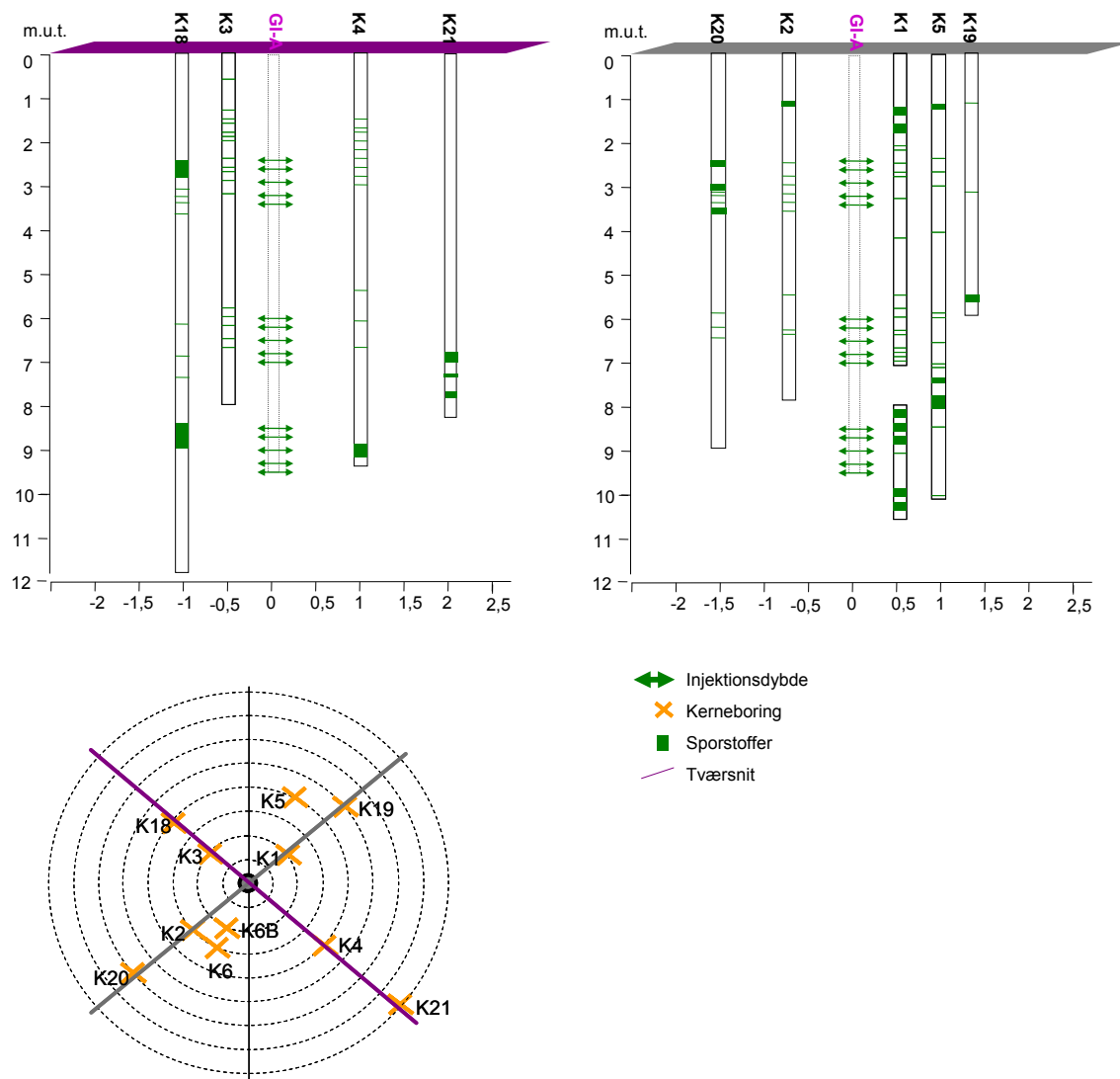


Til højre ses diffusionsprofiler fra hver af de tre injektionsinterval. Diffusionsprofilerne er lavet i forskellige kerner (GI-K5, GI-K3 og GI-K12). Ved siden af hvert profil ses billederne taget af den pågældende kerne. Der ses en god sammenhæng mellem høje koncentrationer og kraftigt fluorescerende sporstofområder.

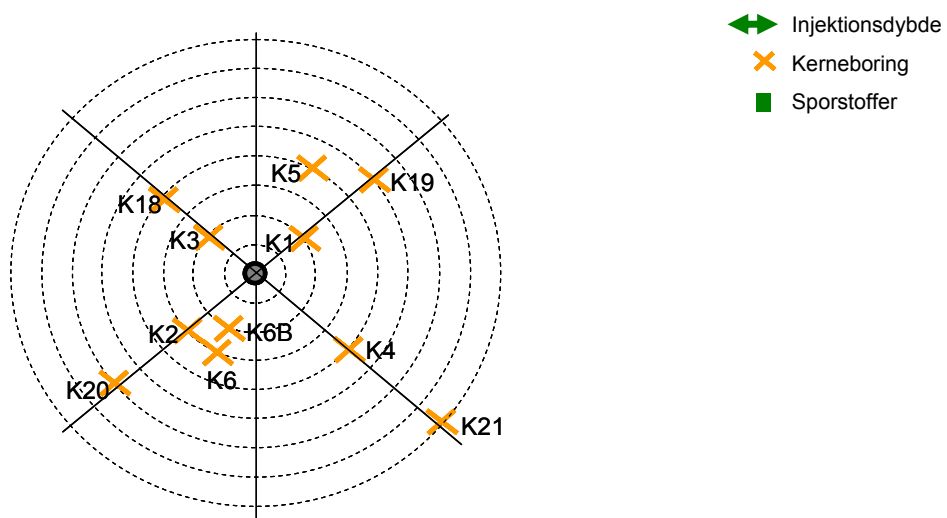
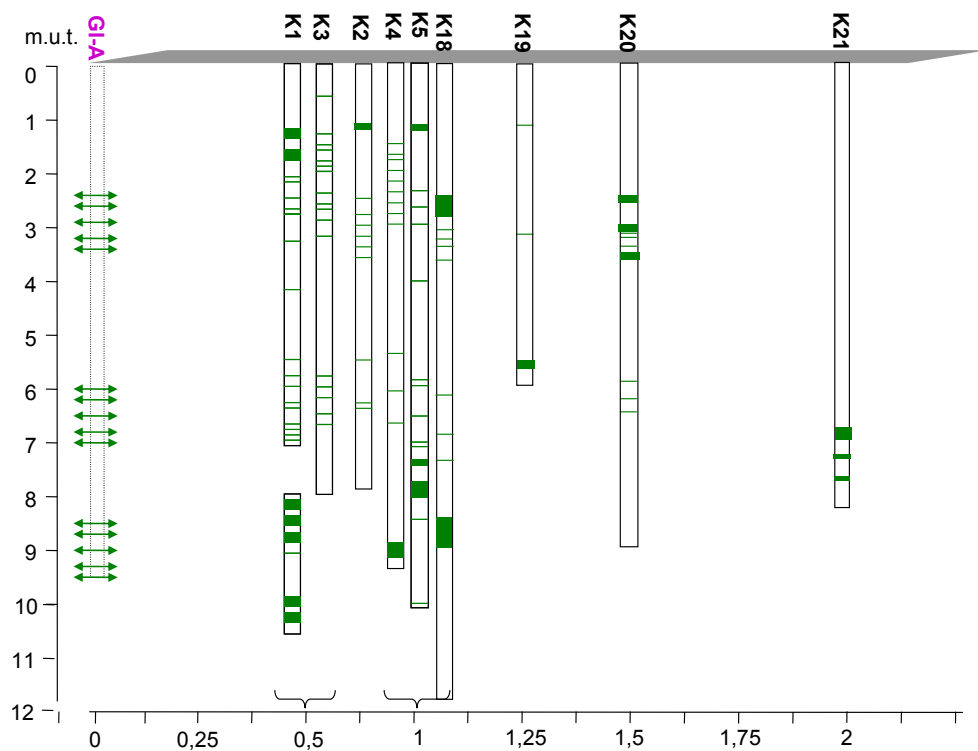


9 Bilag – Spredning af sporstof, GeoProbe, enkeltinjektionsfelt

Spredningen af sporstof gennem to tværsnit i enkeltinjektionsfeltet kan ses i nedenstående figurer.



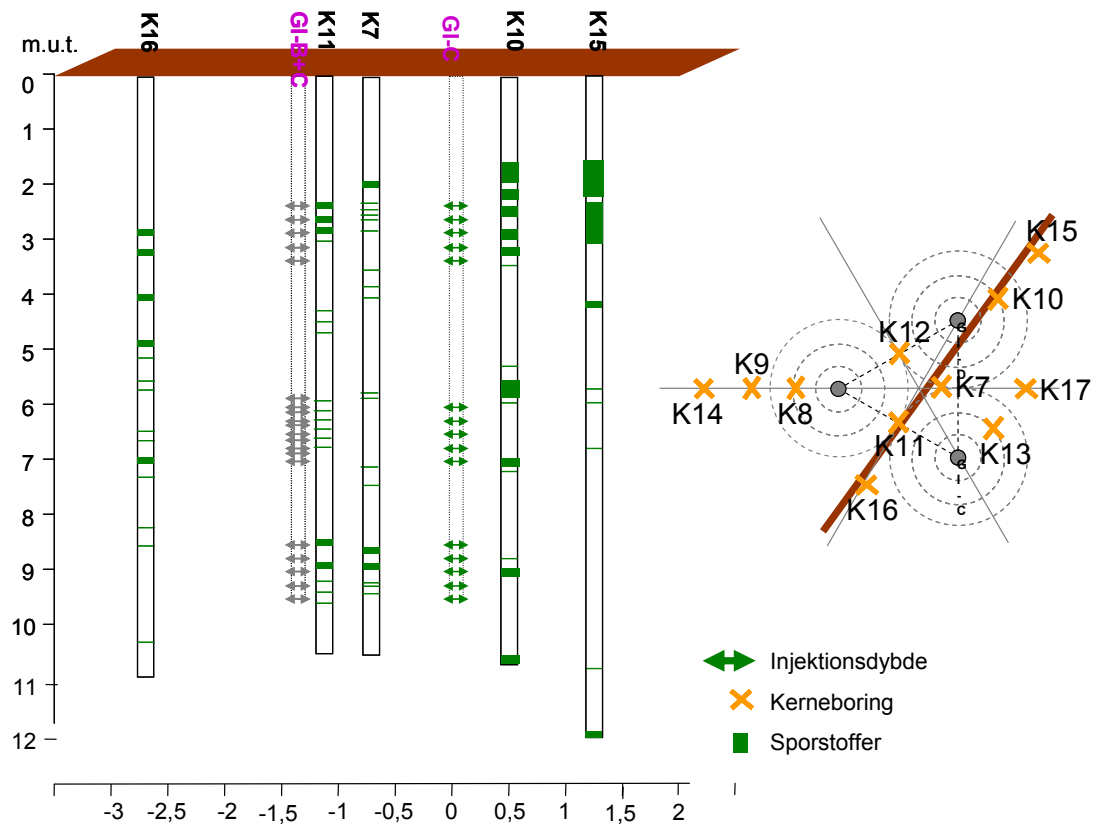
Spredningen af sporstof omkring enkelt injektionspunktet. Kernerne er sorteret i forhold til afstanden til injektionspunktet.



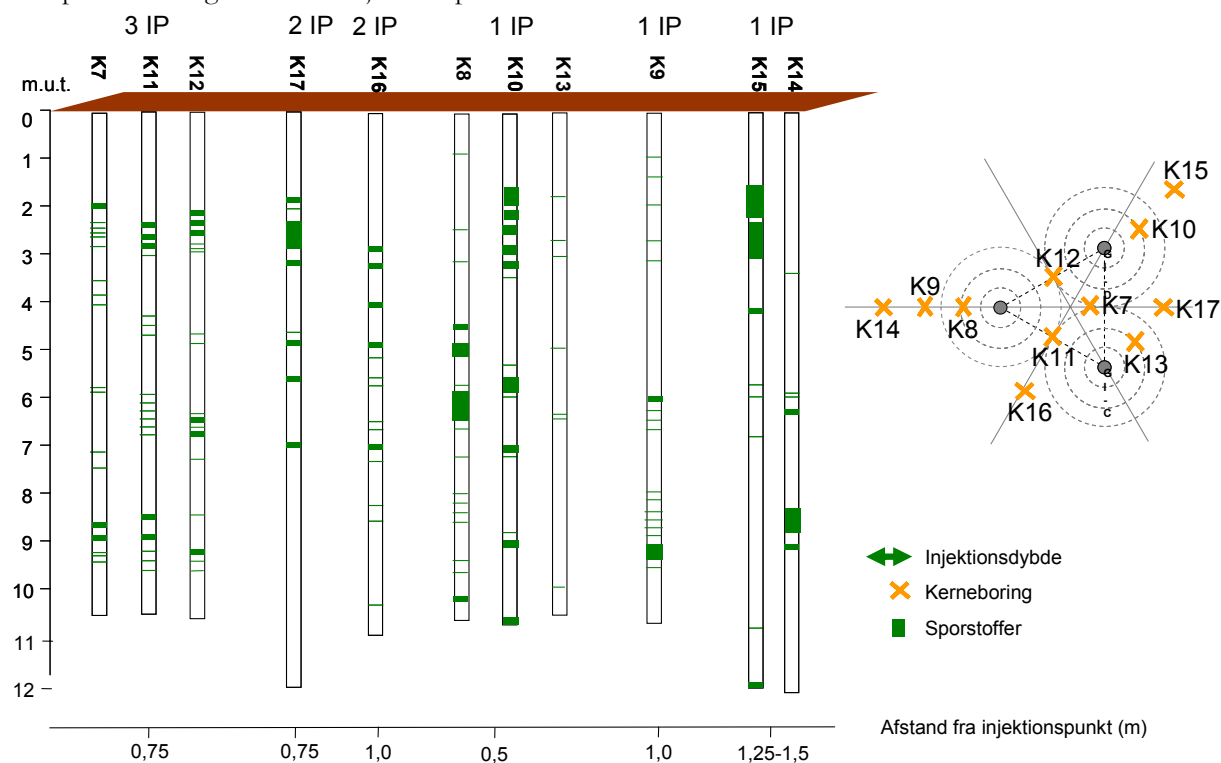
- Injektionsdybde
- Kerneboring
- Sporstof

10 Bilag – Spredning af sporstof, GeoProbe, klyngefelt

Spredning af sporstof i kernerne fra et tværsnit gennem klyngeinjektionsfeltet. Injektionspunkterne GI-B og -C er illustreret med grå for at markere dybderne hvor disse kan have påvirket omkringliggende kerner.



De udtagne kerner i klynge injektionsfeltet sorteret efter, hvor mange injektionspunkter de forventes at være påvirket af og afstand til injektionspunkt.



11 Bilag – Forsøgsopsætning, hydraulisk frakturering

I nedenstående figur ses den vertikale forureningsfordeling på Vadsbyvej sammen med fraktureringsdybderne. Følgende aktiviteter er udført i forbindelse med den hydrauliske frakturering på lokaliteten:

1. Hydraulisk frakturering i én boring (HF-A) i 4 tætte dybder: 6,25, 6,5, 6,75 og 7 m u.t. (20. og 21. november 2008).
2. Hydraulisk frakturering i tre boringer (HF-B, -C og -D) henholdsvis 3 (10. november 2008), 6,5 og 9,5 m u.t (12. november 2008).

Frakturerne er fyldt med farvet sand (epoxy-coated sand granules) i forskellige farver, for at kunne genkende de specifikke frakturer. De benyttede farver til hver fraktur kan ses i nedenstående figur.

Blandingsforholdene af henholdsvis guar, borax og breaker er følgende:

- 600 L water + 2,4 kg Guar
- 20 L water + 200 g Borax
- 6 L water + 60 g Breaker LEB-4

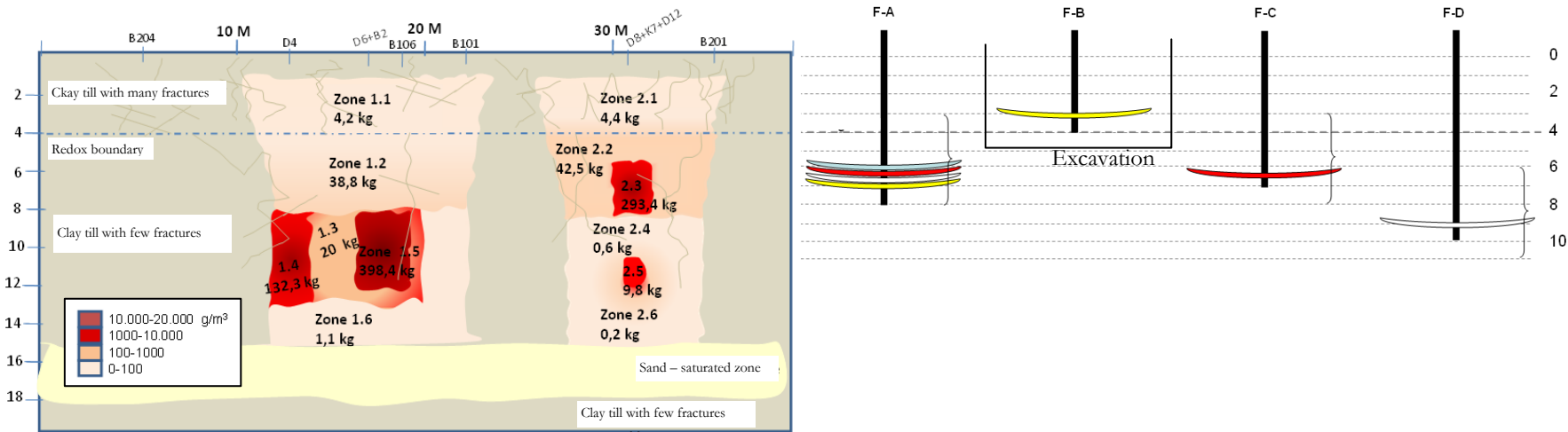
De benyttede flow ved fraktureringerne var:

- Guar pump: 1,0 m³/hr
- Sand feeder: 1,0 ton/hr ~ 20 Hz
- Mixing rotor: 1,5 m³/hr ~ 90 Hz
- Borax: 40 l/hr
- Breaker : 6 l/hr (2 l/hr for HF-D)

Koordinaterne og terrænkoterne på fraktureringsboringerne kan ses i nedenstående table.

Frakturboring	UTM X	UTM Y	Kote
HF-A	323921,7	6173696,3	23,11
HF-B	323916,0	6173698,0	22,7
HF-C	323923,9	6173702,7	23,25
HF-D	323926,3	6173709,4	23,58

Den vertikale forureningsfordeling på Vadsbyvej (Orbicon, 2008) (h), (v) dybderne hvor der er udført hydraulisk frakturering.



12 Bilag – Kerner, hydraulisk frakturering

For at undersøge spredningen af fraktursand og sporstoffer er følgende aktiviteter udført:

1. Udtagning af 15 kerner ved fraktur boring HF-A, HF-C og HF-D,
2. Udgravning af HF-B til 3,5 m u.t.

Kernerne rundt om de hydrauliske frakturer er placeret ud fra den størst observerede landhævning under og efter fraktureringen. Både rundt om de hydrauliske frakturer og ved GeoProbe injektionerne er kerneboringer så vidt muligt placeret i tværgående profiler for at opnå kendskab til den rumlige fordeling.

COWI udtog kerner med GeoProbe i 4 cm 1,2 m klare plasticrør. Brøker udtog 2 m kerne af gangen med en diameter på ca. 6 cm med vibrosonisk udstyr i tagrender. Ejlskov udtog kerner med GeoProbe i 6 cm 1,2 m lange klare plasticrør.

Oversigt over udtagne kerner i det hydrauliske frakturfelt samt boreentreprenør og tidspunkt. Farverne kan følges i ovenstående figur. Koterne af kernerne er antaget at være tilsvarende koten for den fraktureringsboring kernen er udtaget ved.

Kerne	Udtaget af	Dato	Dybde (m u.t.)
HF-K1	COWI	17/11 – 2008	0-11
HF-K2	COWI	19/11 – 2008	0-11
HF-K3	COWI	26/12 – 2008	2-8
HF-K4	Brøker	28/12 – 2008	0-7,6
HF-K5	COWI	27/12 – 2008	2-8
HF-K6	COWI	27/12 – 2008	2-8
HF-K7	Ejlskov	2/12 – 2008	1,2-8
HF-K8	Ejlskov	2/12 – 2008	1,2-8
HF-K9	Ejlskov	2/12 – 2008	1,2-8
HF-K10	Ejlskov	2/12 – 2008	1,2-8
HF-K11	Ejlskov	3/12 – 2008	1,2-8
HF-K12	Ejlskov	3/12 – 2008	1,2-8
HF-K13	Ejlskov	3/12 – 2008	1,2-8
HF-K14	Ejlskov	3/12 – 2008	1,2-8
HF-K16	Ejlskov	21/1-2009	0-8
HF-K17	Brøker	3/3-2009	0-6
HF-K21	Brøker	3/3-2009	0-6

Placeringen af kerner ved de 4 fraktureringsboringer. Farverne markerer, hvornår kernerne er udtaget. Farverne er koblet til ovenstående tabel.

Under kerneudtagningen var det nødvendigt at flytte på flere kerneudtagningspunkter på grund af større sten.

Kernerne er efter udtagning opbevaret mørkt ved 10°C. Opbevaringstiden inden analyse er hold så kort som muligt. Kernerne er analyseret én af gangen.

I en enkelt kerne (HF-K16) blev der fundet ca. 0,5 m vådt sediment mellem 5-6 m, hvor det ikke var muligt at identificere om der eventuelt var fraktursand tilstede. Sedimentet blev derfor skyllet og siet for bedre at kunne vurdere tilstedeværelsen af sandet. Der blev imidlertid ikke fundet noget fraktursand.

Delprøvetagningsstrategi af kerner

Der er udtaget jordprøver fra alle fluoroscerende områder i kernerne fra GI-A med henblik på at lave en detaljeret massebalance for sporstoffordelingen. Endvidere er der udtaget prøver til diffusionsprofiler fra

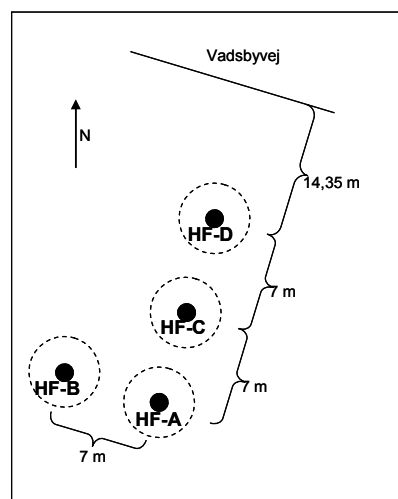
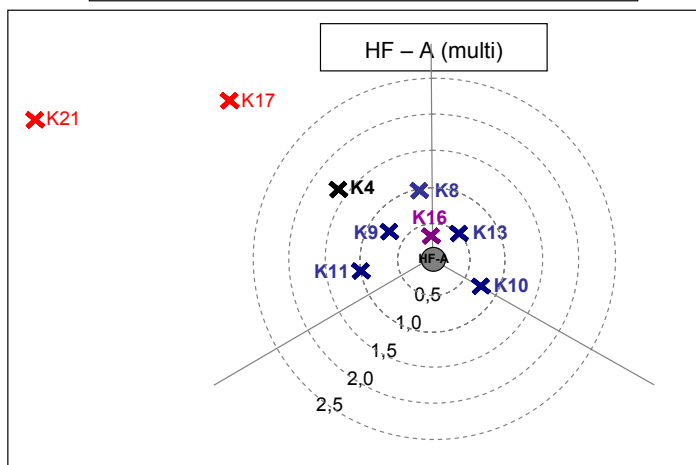
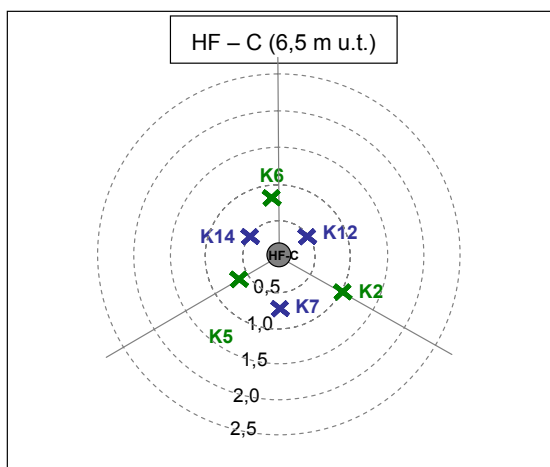
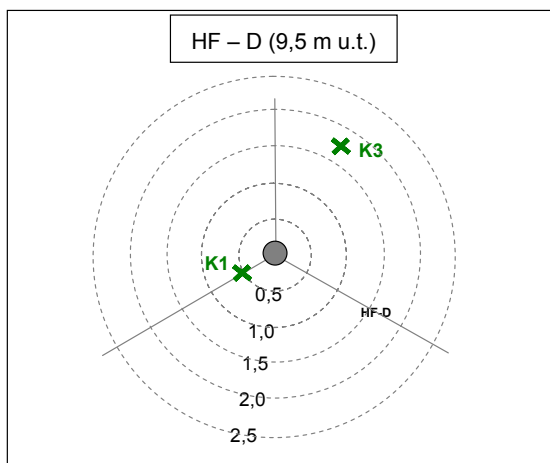
hvert af injektionsintervallerne (2,5-3,5; 6-7; 8,5-9,5 m u.t.) for at undersøge sporstoftransporten i og omkring sprækkerne. I klyngefeltet er der udtaget stikprøver, der skal benyttes til at vurdere koncentrationsniveau på billederne taget under UV-lys. Tilsvarende prøvetagningsstrategi er benyttet for kernerne fra de hydrauliske frakturer.

Analyse af jordprøver

Jordprøverne er udtaget i vials indeholdende 20 ml borax (0,02 M) til at ekstrahere de fluorescerende stoffer fra jorden til vandfasen. Jordprøverne er opbevaret i roterkasse ved 10°C i minimum ét døgn inden analyse. Koncentrationerne af fluorescein og Rhodamine WT er målt på et GGUN-FL02 fluorometer /13/.

Billedanalyse

Til at fremhæve sporstofferne på billederne er billedprogrammet Adobe Photoshop CS2 benyttet.

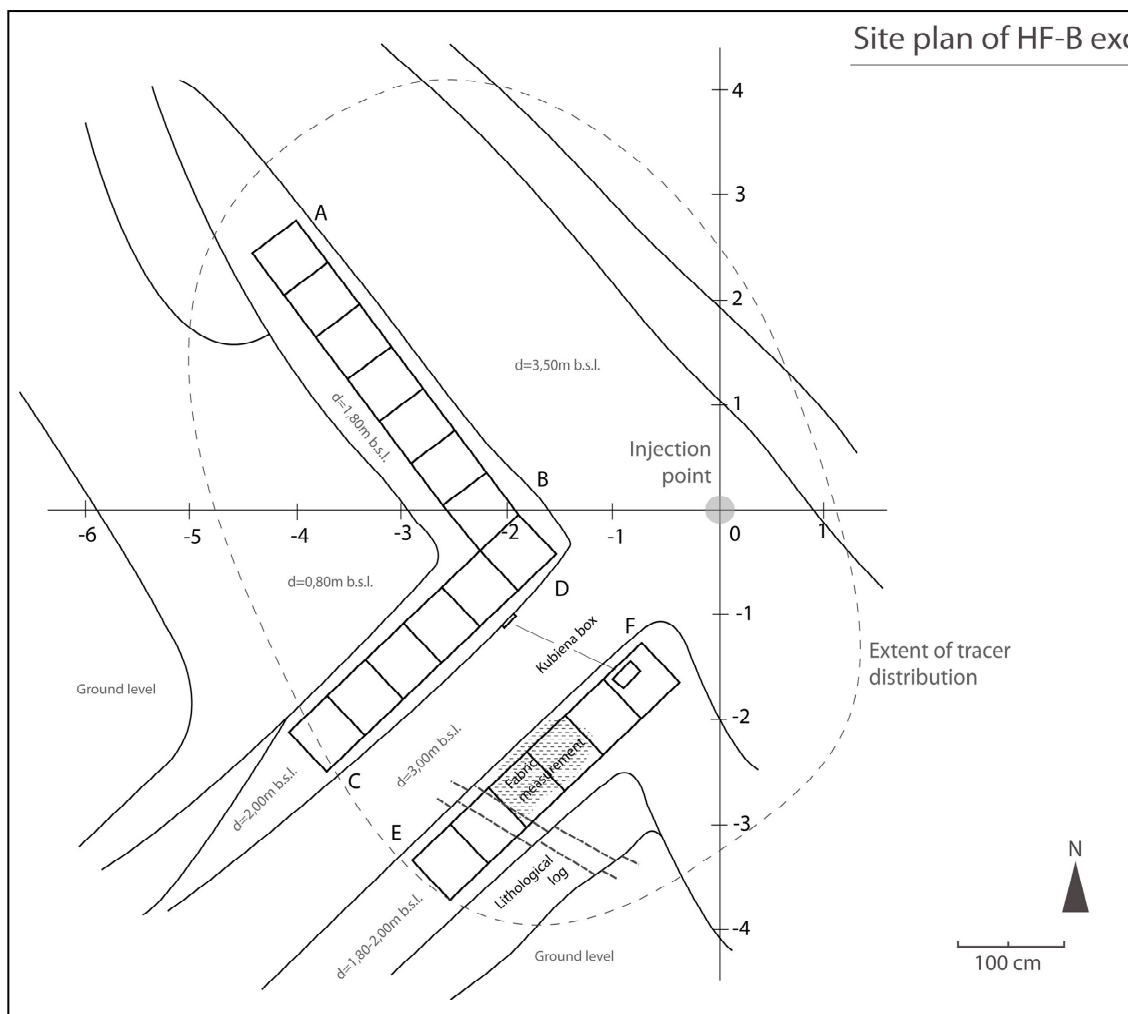


13 Bilag – Udgravning, hydraulisk frakturering

Udgravningen ved den hydrauliske fraktur blev placeret ud fra den maksimale observerede landhævning under og efter fraktureringen. Det vil sige, udgravningen blev placeret tværs gennem området, hvor den største udbredelse af frakturen blev forventet at være. Derudover blev der placeret en grav ortogonal herpå for at få kendskab til den geometriske udbredelse af frakturen. Udgravningen blev lavet til ca. 0,5-1 m under dybden, hvor frakturen blev fundet.

Udgravningen er lavet fra den 20. til den 23. januar 2009. Udgravningen blev udført af Riisengården. Skitse af udgravningen af den hydrauliske fraktur i 3 m u.t. kan ses i nedenstående figur.





Udgravning af hydraulisk fraktur i 3 m u.t.

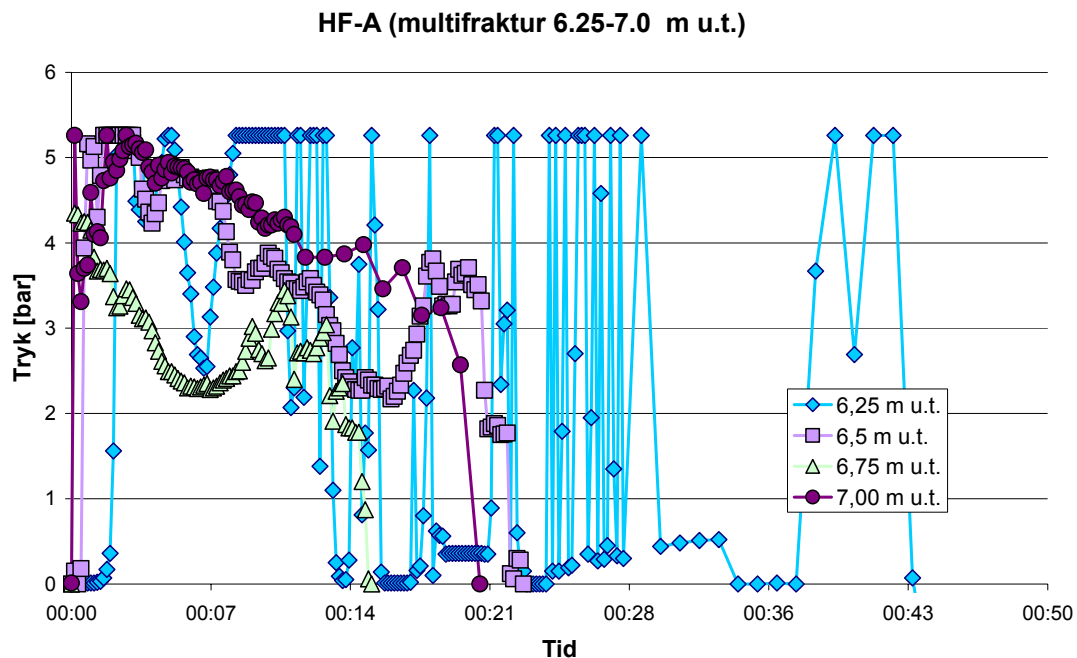


14 Bilag – Tryk, hydraulisk frakturering

Ved den hydrauliske frakturering var der monteret en trykmåler ved udløbet af blandingsanlægget til måling af trykket under fraktureringen. Der var endvidere monteret en trykmåler ved fraktureringsboringen for at måle trykhøjden i boringen under fraktureringen. Trykmålingerne blev logget elektronisk og efterfølgende overført til en computer.

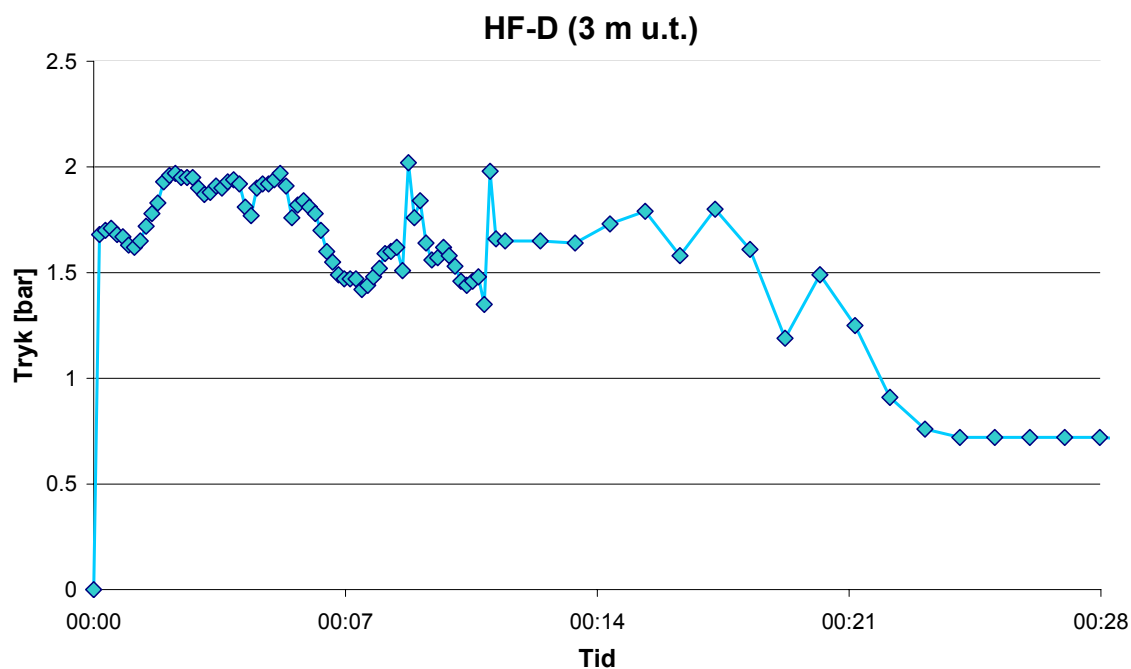
Multifraktur fra 6,25 til 7,00 m u.t.:

- **6,25 m u.t.:** Trykkurven indikerer vertikal udbredelse helt fra starten. Eftersom der ikke blev observeret opskydning er sprækken sandsynligvis bøjet af over redoxgrænsen.
- **6,50 m u.t.:** Trykkurven indikerer vertikal udbredelse af sprækken.
- **6,75 m u.t.:** Det lavere tryk end den overliggende sprække kan indikere at den løber sammen med den overliggende sprække.
- **7,00 m u.t.:** Det højere tryk end den overliggende sprække antyder udbredelse af sprække.



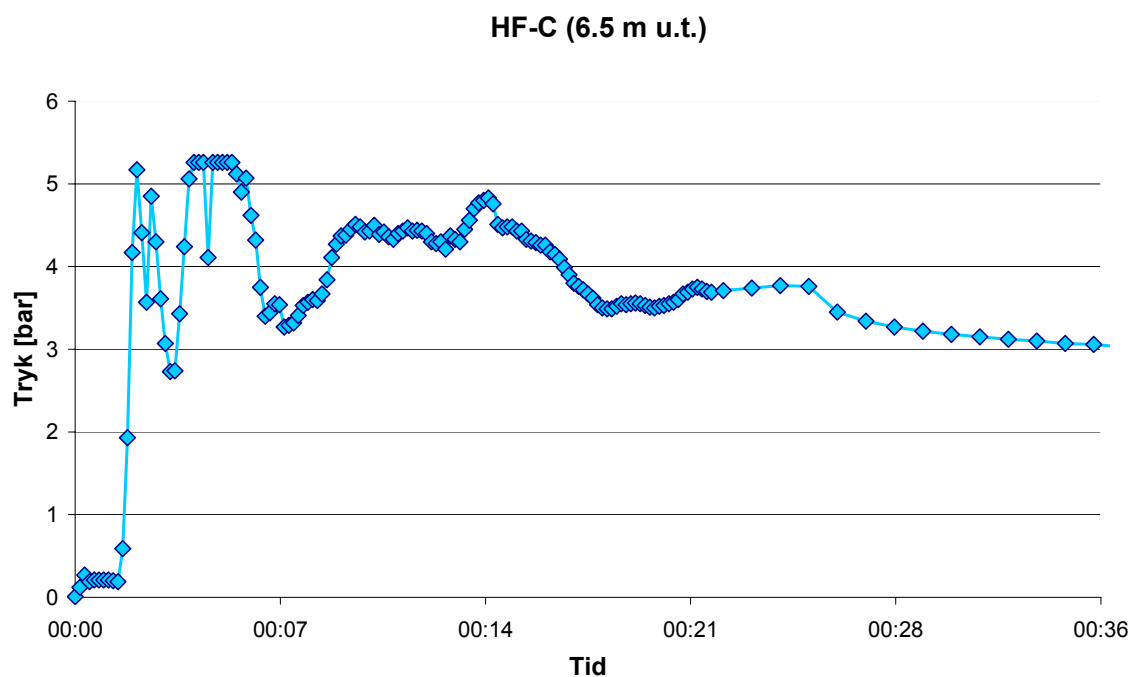
HF-D - Sprække i 3 m u.t.:

- Trykkurven indikerer at sprækken har en bowle formet udbredelse i en retning.



HF-C – Sprække i 6,5 m u.t.:

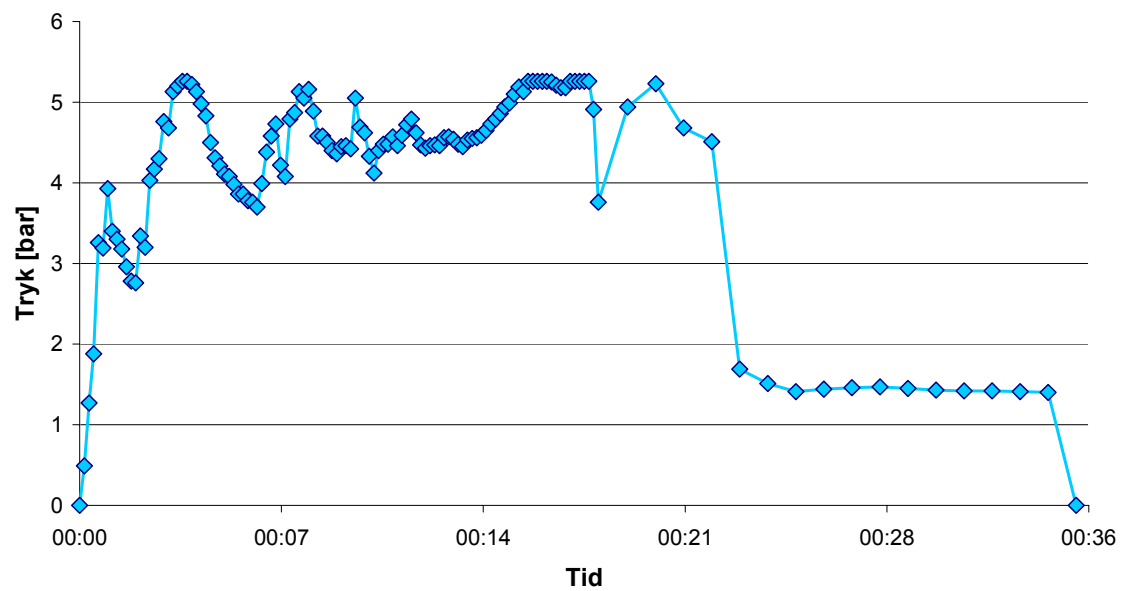
- Trykkurven indikerer en fladt udbredt sprække. Variationerne mellem 3-7 min tyder på varieret/ukontrolleret sand:guar ratio).



HF-D - Sprække i 9,5 m u.t.:

- Trykkurve antyder smal vertikal sprække.

HF-D (9.5 m u.t.)

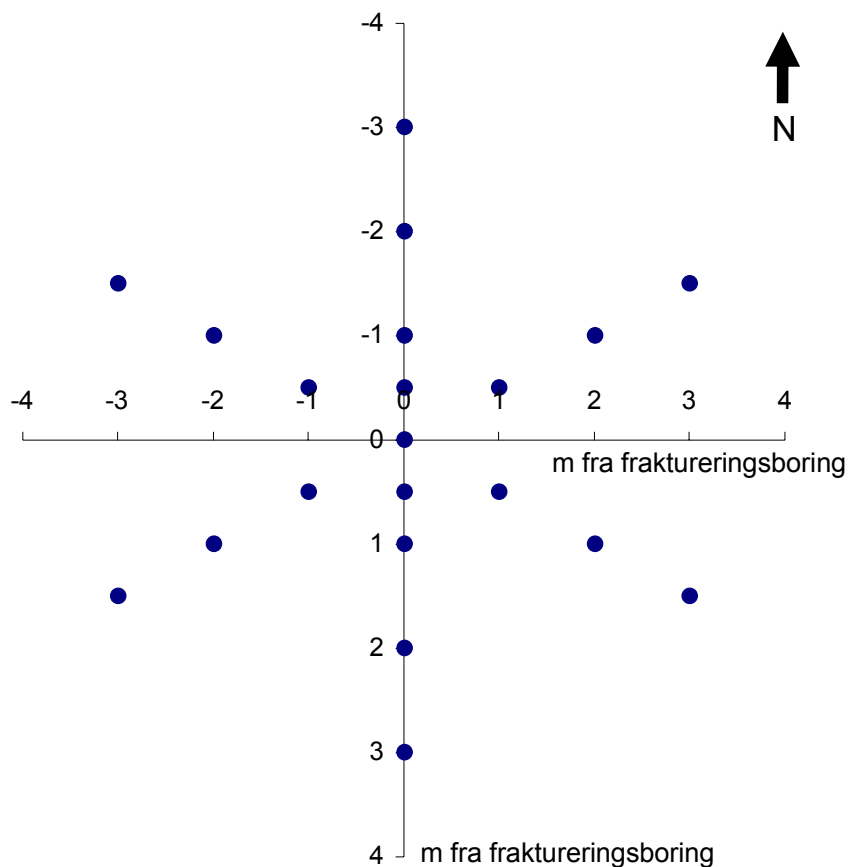


15 Bilag – Landhævning, hydraulisk frakturering

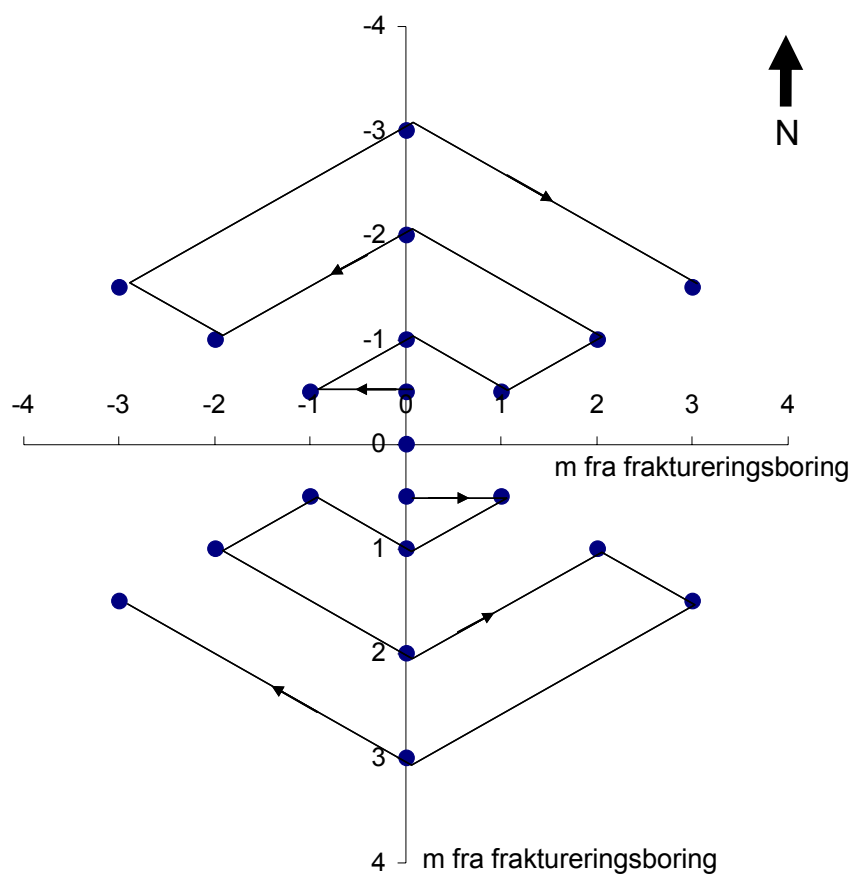
Landhævningen blev ved hver frakturering målt ved løbende nivellement under anvendelse af en totalstation (Leica TC600).

Landhævningen blev målt i 21 punkter fordelt i et 6×6 m grid omkring fraktureringsboringen. Opsætningen er lavet ud fra /6/. I alle målepunkter blev en afmærkningspind slået ned i jorden (top af pind 25 cm over terræn, se nedenstående figur og billede). Inden fraktureringen blev startet, blev alle punkter målt ind (svarende til tid 0). Under fraktureringen blev terrænet løbende målt. Terrænmålingerne blev lavet ved at to personer bevægede sig rundt i et forudbestemt mønster under hele fraktureringen, mens en tredje person målte punktet ind med totalstationen (rækkefølgen af terrænmålingerne kan ses i nedenstående figur). Terrænet blev målt indtil fraktureringen blev afsluttet, og igen ca. 1 time efter fraktureringen var afsluttet.

Målepunkterne til måling af landhævning under fraktureringen fordelt rundt om fraktureringsboringen (0,0).



Løbebane til måling af landhævningen under fraktureringen.



Fraktureringsboring og landmåler pinde.



16 Bilag – Udbredelse af sporstof, Hydraulisk frakturering

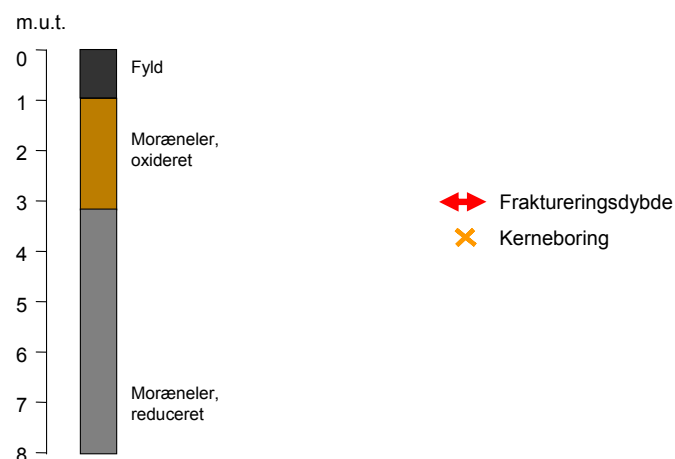
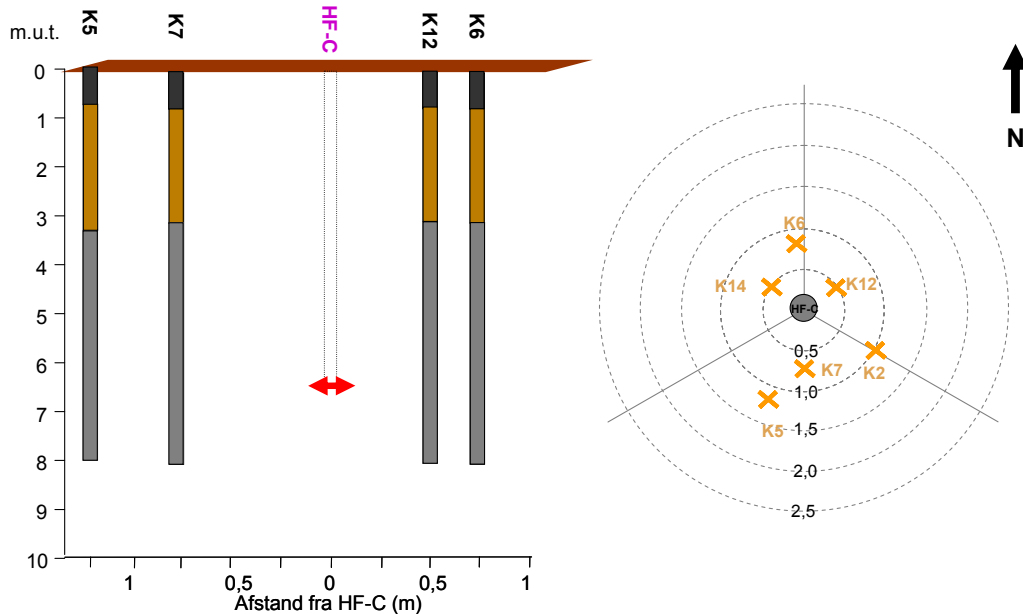
I nedenstående tabel ses dybderne, hvor der er fundet sporstof og sporstoffernes udbredelse. Det er endvidere markeret om sporstofferne er fundet som et diffusivt område (D) eller om det er fundet i forbindelse med høj permeabelt sediment (V). Små ikke gennemgående pletter er markeret med P. I dybderne, hvor sporstofferne er fundet i forbindelse med fraktursand, er farven på dette noteret.

Kerne	Sporstofudbredelse start dybde (m)	Sporstofudbredelse slut dybde (m)	Udbredelse (m)	Udbredelse (D=diffust, V=Vædt, P=plet)
HF-K2	7,00	7,03	0,03	D
HF-K4	5,92	5,98	0,06	D, Gul sand
HF-K5	2,80	2,89	0,09	D
HF-K6	6,23	6,38	0,15	D
HF-K7	1,20	2,20	1,00	D
	2,25	2,25	0,00	D
	6,61	6,66	0,05	D, rød sprække
HF-K8	6,35	6,38	0,03	D
	6,54	6,62	0,07	P
	6,79	6,88	0,08	D, gul sprække
	7,05	7,09	0,04	P
HF-K9	5,38	5,47	0,09	D
	5,76	5,80	0,04	D
	6,71	6,71	0,00	D, hvid sand
	6,76	6,76	0,00	D, gult sand
HF-K10	5,49	5,56	0,07	D, gult og hvidt sand
	6,93	7,05	0,11	D, grønt sand
HF-K11	5,31	5,51	0,20	D
HF-K12	6,94	6,99	0,05	D
	7,45	7,46	0,01	D
	7,67	7,77	0,11	D
HF-K13	6,64	6,69	0,06	D, gult sand
HF-K14	2,07	2,35	0,27	D
	2,49	2,49	0,00	P
	2,93	3,01	0,07	D
HF-K16	5,37	5,90	0,53	D
	6,95	7,02	0,08	D, gult sand

17 Bilag - Optegninger af geologi, Hydraulisk frakturering

Den geologiske sammensætning i kernerne udtaget ved frakturboringen i 6,5 m u.t. kan ses herunder. Der findes ca. 80 cm, fyld. Herunder findes der moræneler. Redoxgrænsen findes i 3,2 til 3,5 m u.t.

Derunder ses en konceptuel kerne tolket på baggrund af kerneobservationerne.

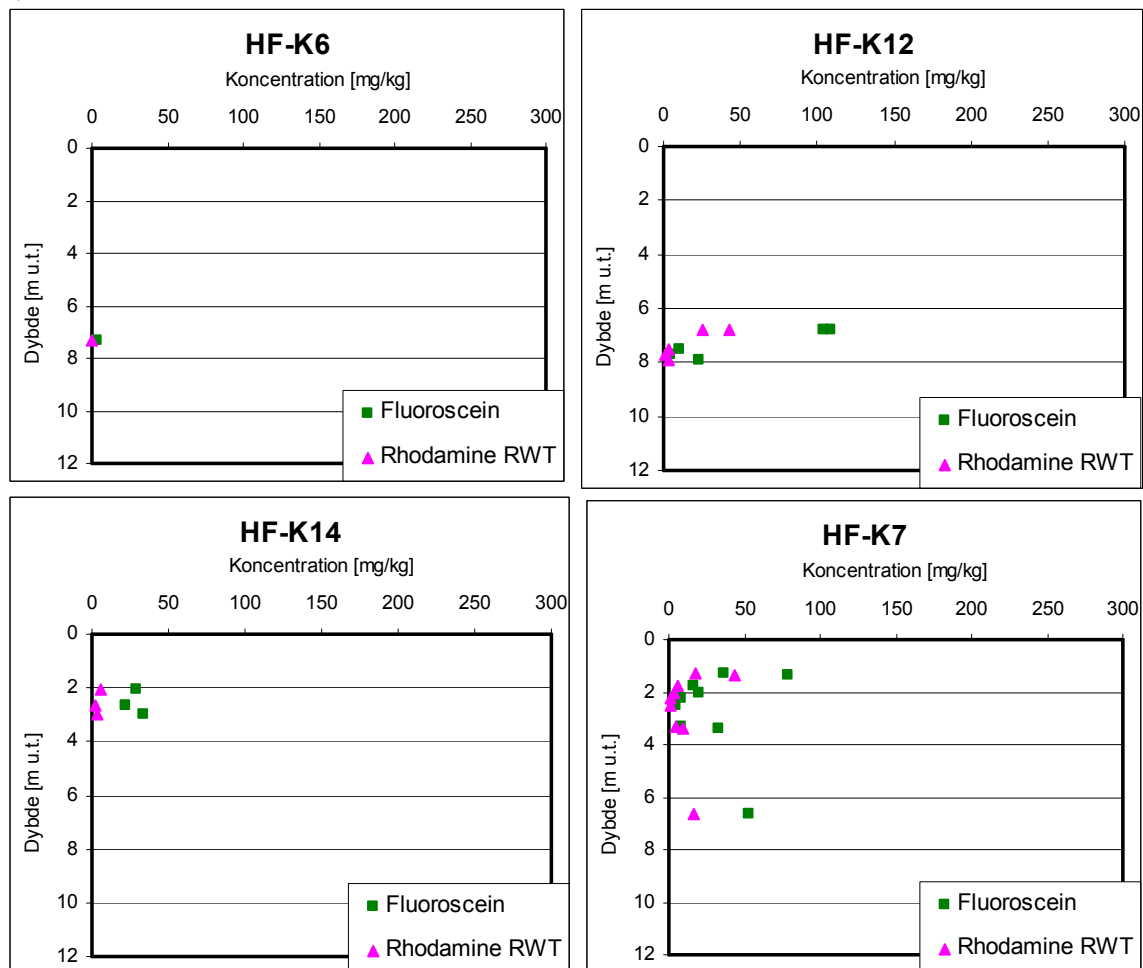


Den geologiske sammensætning i kernerne udtaget ved multifrakturboringen (6,25, 6,5, 6,75 og 7,00 m u.t.) kan ses herunder. Der findes ca. 80 cm, fyld. Herunder findes der moræneler. Redoxgrænsen findes i 3,2 til 3,5 m u.t.

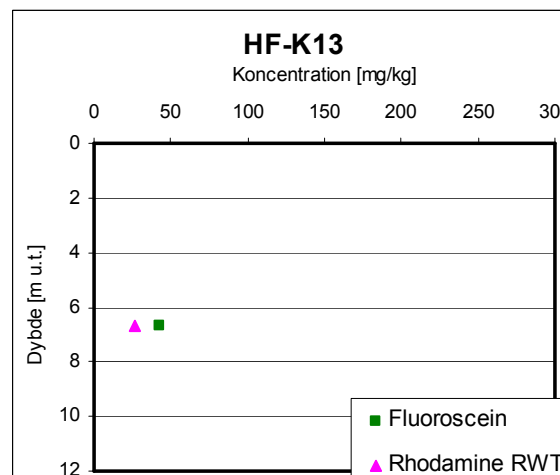
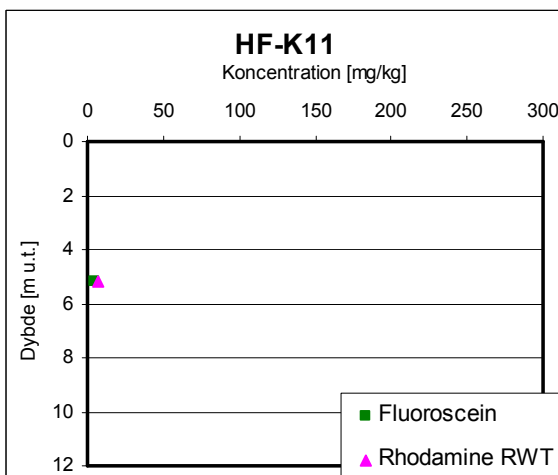
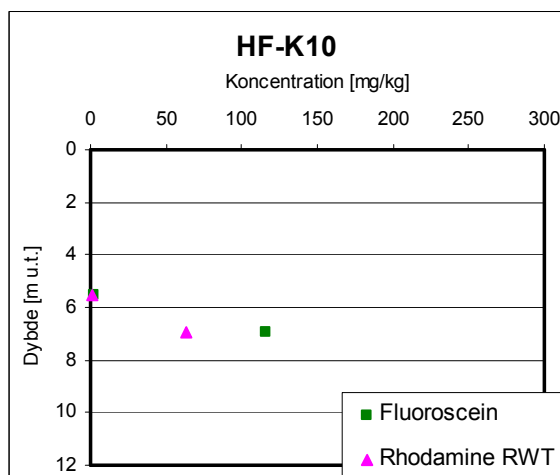
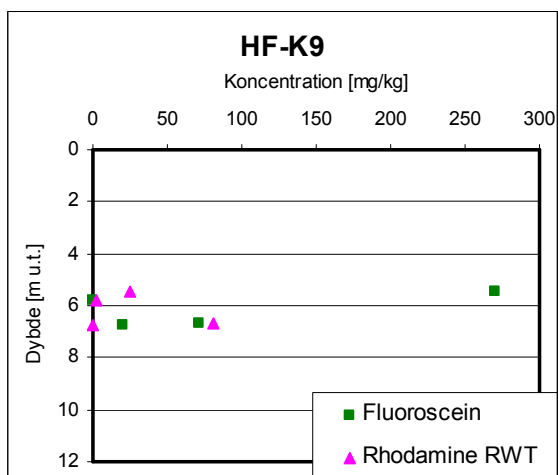
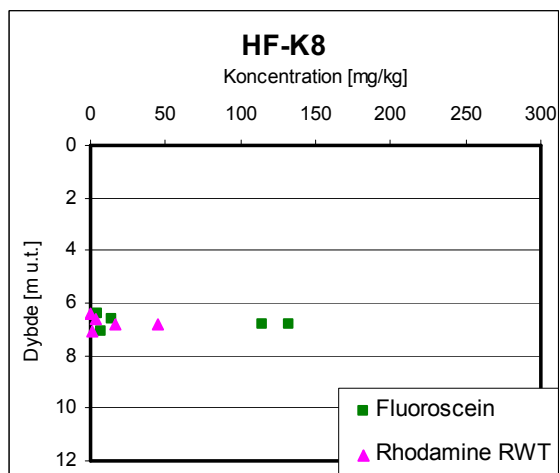
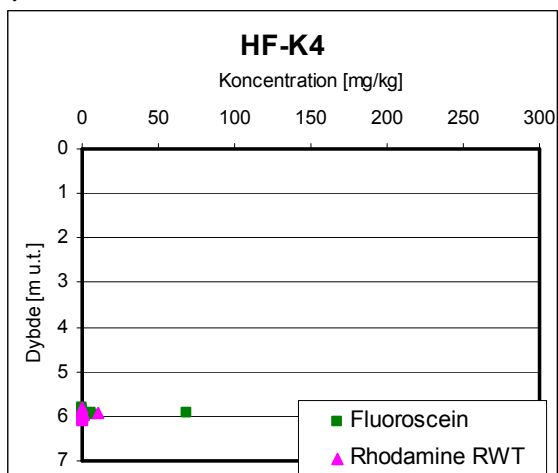
Derunder ses en konceptuel kerne tolket på baggrund af kerneobservationerne.

18 Bilag – Koncentration af sporstoffer, Hydraulisk frakturering

Herunder ses de målte koncentrationer af rhodamine WT (rød) og fluorescein (grøn) i kernerne fra de hydrauliske fraktur i 6,5 m u.t.



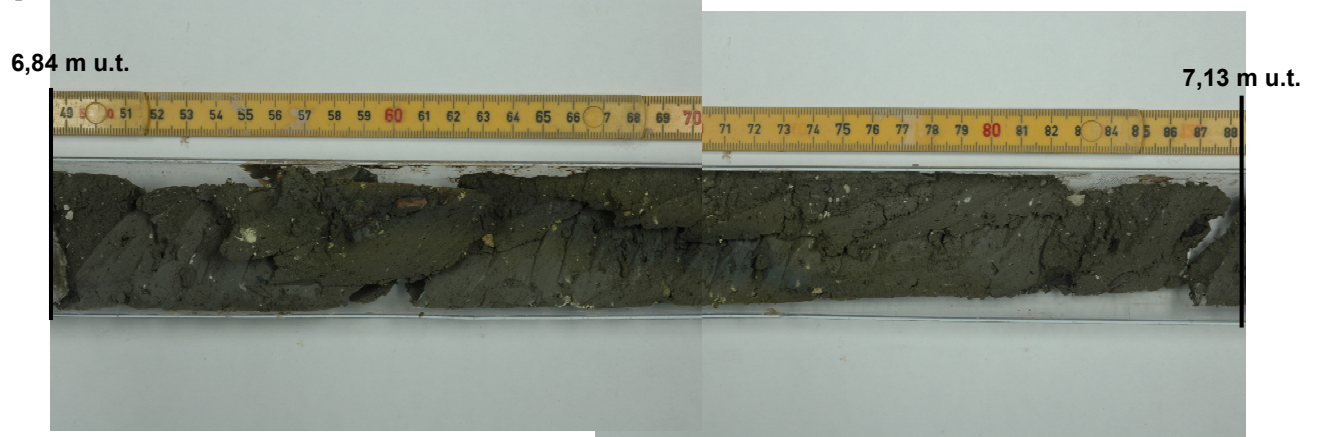
Herunder ses de målte koncentrationer af rhodamine WT (rød) og fluorescein (grøn) i kernerne fra de hydrauliske multifraktur.



19 Bilag – Hydrauliske frakturer

Hydraulisk multi fraktur i 6,25, 6,5, 6,75 og 7 m u.t.

Sprække i 6,25 m u.t. HF-K10



Sprække i 6,75 og 7 m u.t.

5,4 m u.t.

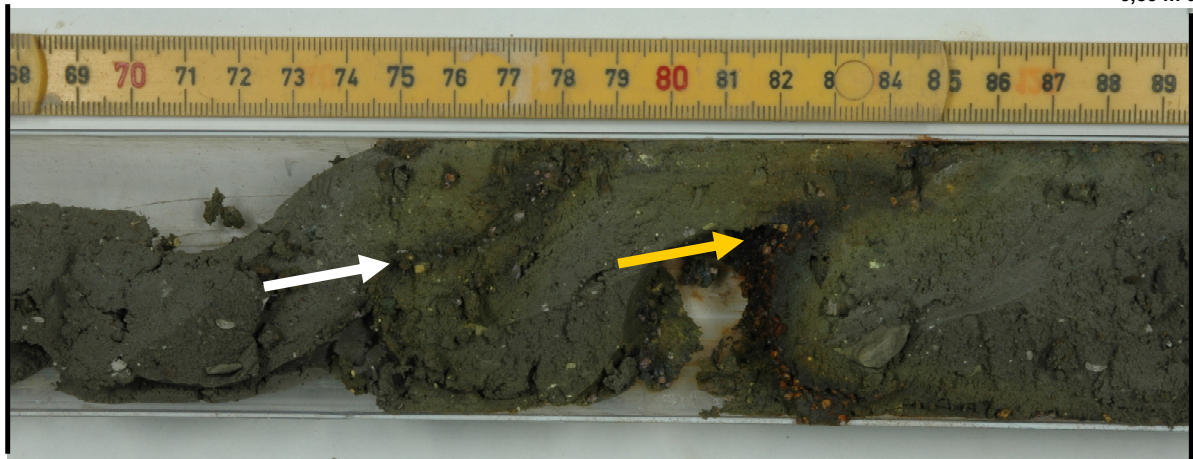
6,6 m u.t.



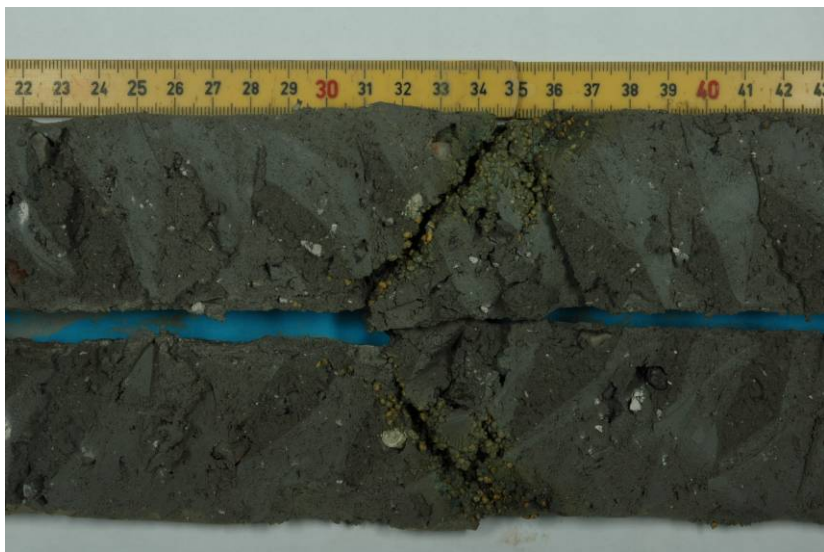
Sprække i 6,75 og 7 m u.t.

6,63 m u.t.

6,83 m u.t.



Sprække i 7 m u.t., HF-K4, sprække i 5,94 m u.t.



Hydraulisk fraktur i 6,5 m u.t.

HF-K7

6,55 m u.t.

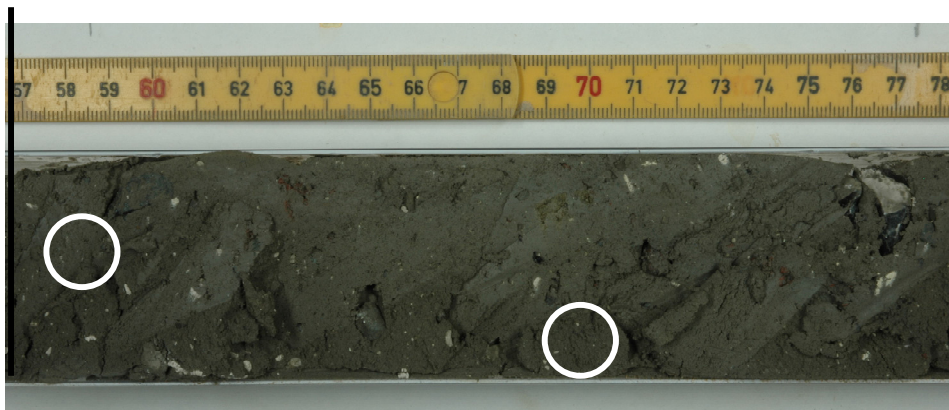
6,72 m u.t.



HF-K12

6,55 m u.t.

6,72 m u.t.




Hydraulisk sprække i 9,5 m u.t.



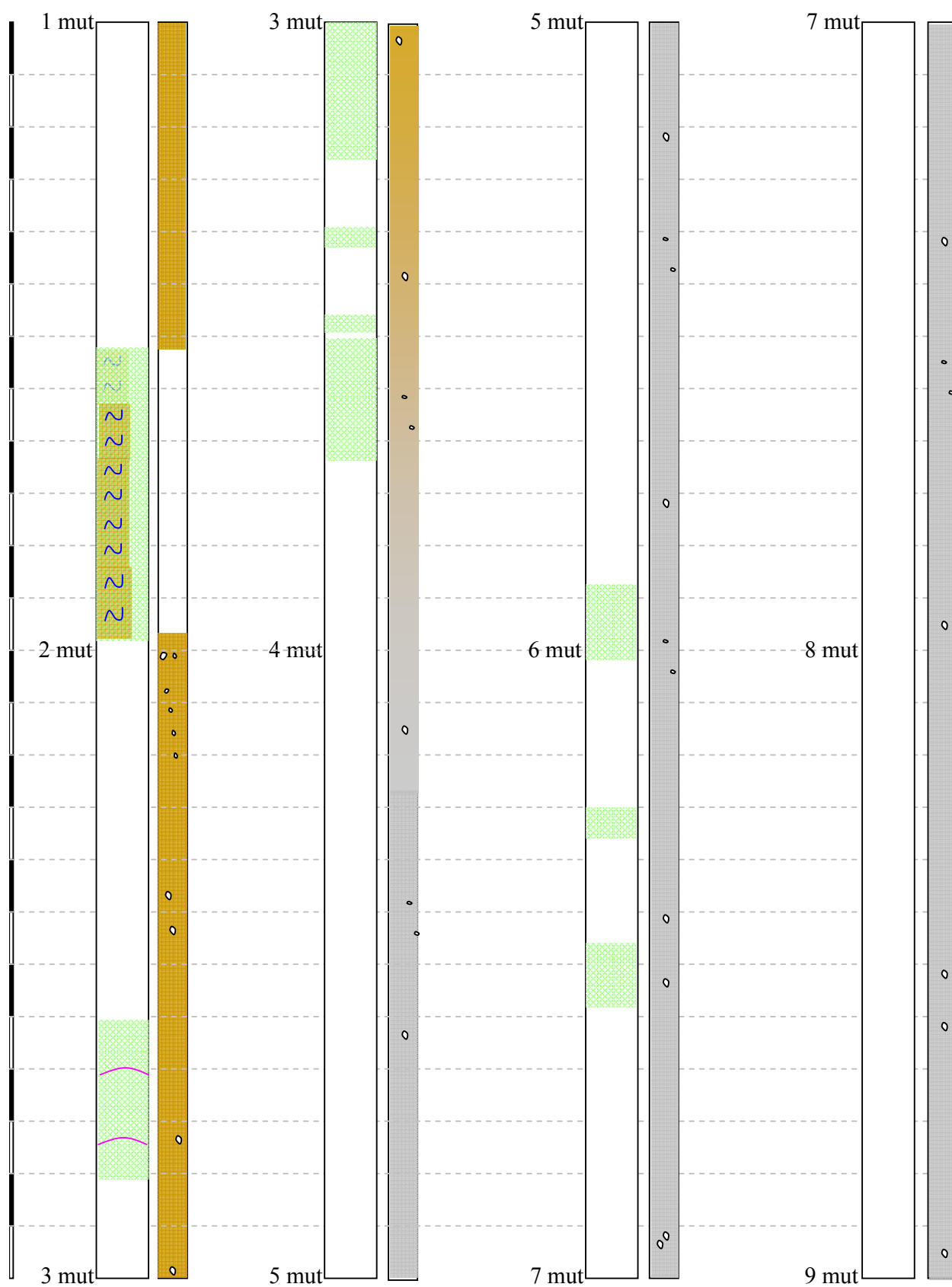
20 Bilag – Optegninger af sporstoffer ud fra kerneprøver

Optegningen af spredningen af sporstoffer ved både direkte injektion med GeoProbe og hydraulisk frakturering er lavet ved at notere dybderne, hvor sporstofferne er fundet (se bilag 6 og 16). Et eksempel kan ses herunder, sammen med billedgrundlaget den er lavet ud fra.

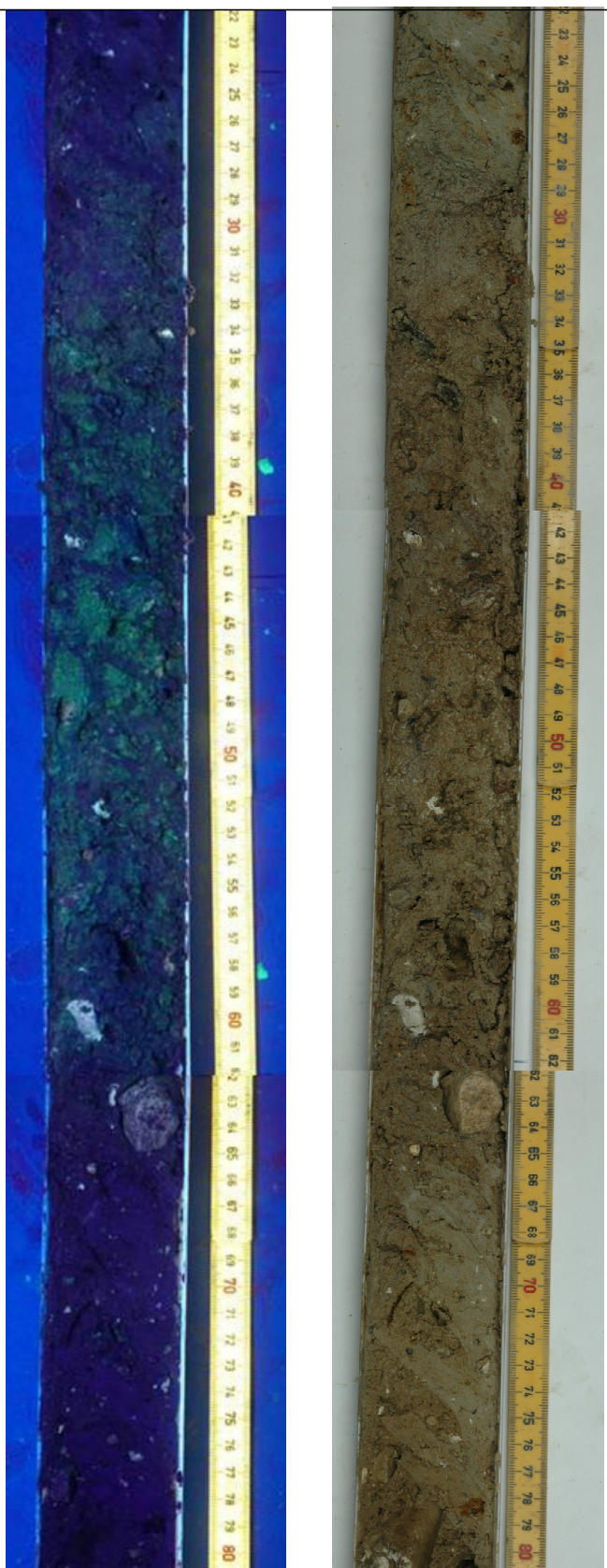
Signaturforklaring:

	Diffust fluorescerende område
	Oxideret ler
	Reduceret ler
	Redoxgrænse
	Morænesand, vådt
	Sten (sort – flint; hvid – kalk)
	Små sten
	Sprække (rød/pink)

Kerne GI-K20

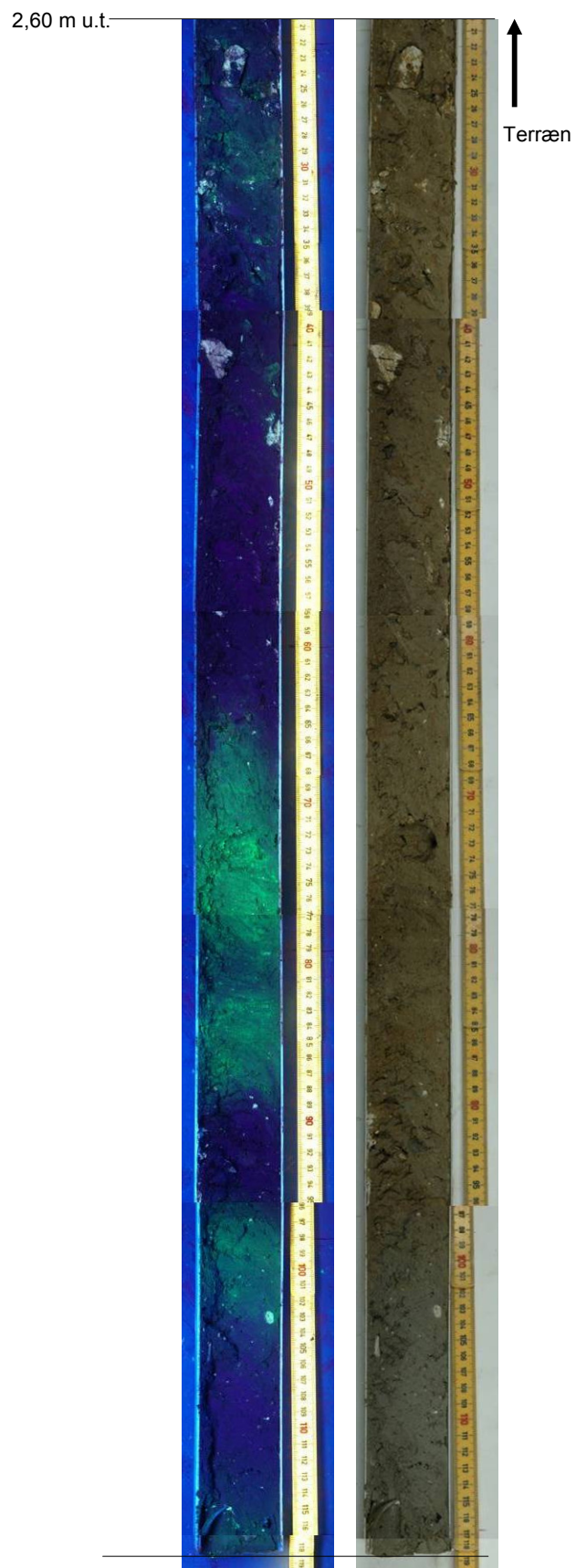


1,45 m u.t.

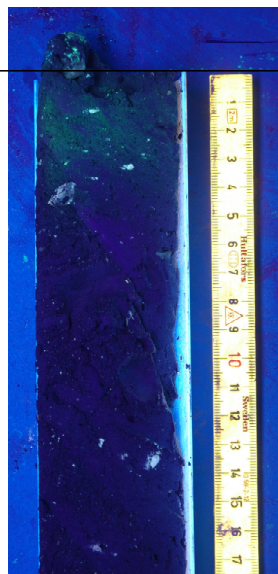


↑
Terræn

2,2 m u.t.



3,5 m u.t.

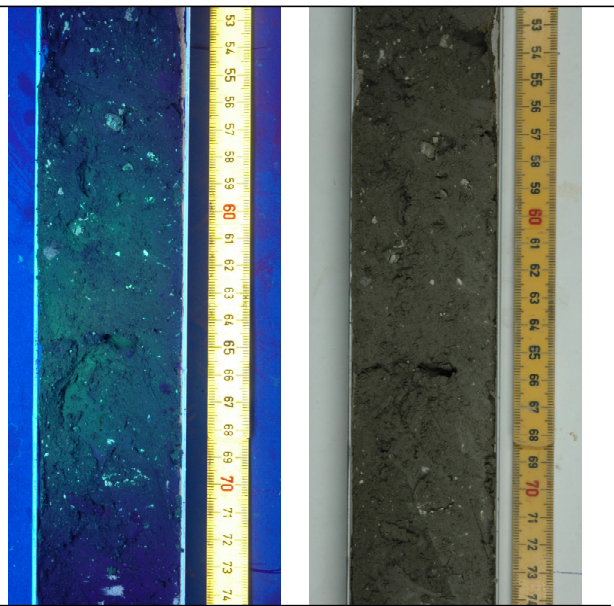


3,65 m u.t.



↑
Terræn

5,90 m u.t.

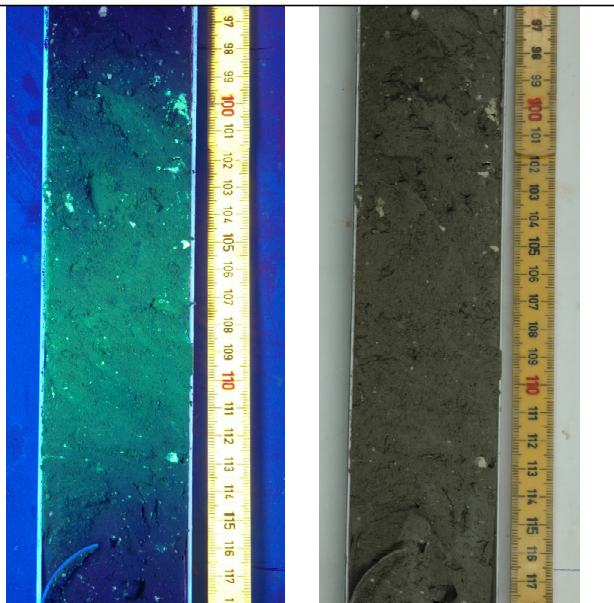


↑
Terræn

6,06 m u.t.

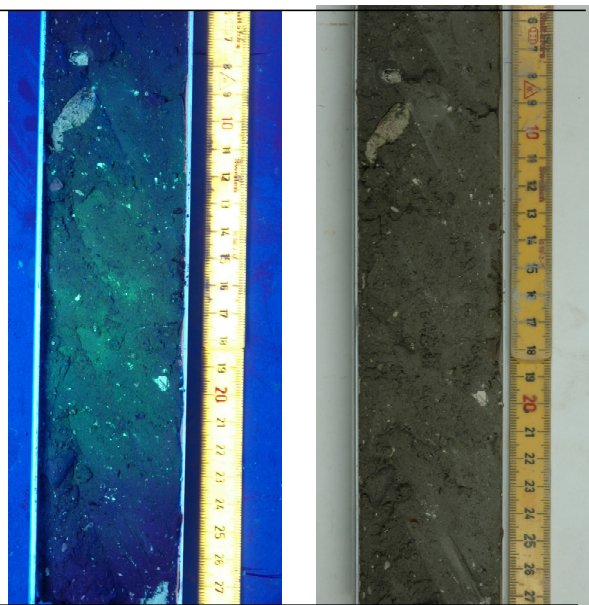


6,22 m u.t.



6,39 m u.t.

6,50 m u.t.



↑
Terræn

6,61 m u.t.

21 Bilag – Moniteringsboring

Boring	UTM X	UTM Y	Terræn Kote [m]
Moniteringsboring	323926,5	6173716,1	23,792



BORERAPPORT

DGU arkivnr: 200. 5830

Borested : Vadsbyvej 16A
2640 Hedehusene

Kommune : Høje-Taastrup
Region : Hovedstaden

Boringsdato : 7/1 2009

Boringsdybde : 17 meter

Terrænkote : 23.8 meter o. DNN

Brøndborer : GEO
MOB-nr :
BB-journr : 32185
BB-bornr : 1

Prøver
- modtaget :
- beskrevet :
- antal gemt :

Formål : Geoteknisk boring
Anvendelse :
Boremetode : Tørboring/slagboring

Kortblad : 1513 ISV
UTM-zone : 32
UTM-koord. : 701182, 6174803

Datum : EUREF89
Koordinatkilde : Brøndborer
Koordinatmetode : GPS

Indtag 1 (seneste)	Ro-vandstand	Pejledato	Ydelse	Sænkning	Pumpetid
	5.4 meter u.t.	7/1 2009			

